SÉRIE DE SÉMINAIRES DE RECHERCHE

Richard H. Fosbrooke,
coordonnateur de la série

Louise Lambert,
réviseuse, version française

Hope Dempsey,
réviseuse, version anglaise

COMMISSION CANADIENNE DES TRANSPORTS
Direction de la recherche
Printemps 1982
Volume 8

Original English text available:
"Research Seminar Series",
Volume 8, Spring 1982

Premier tirage, mai 1983

Commission canadienne des transports
15, rue Eddy, 15[e] ét., Ottawa-Hull K1A 0N9

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1983
Numéro de catalogue TT71-21/1982-1F
ISBN 0-662-12643-2
ISSN 0823-0706

Imprimé au Canada

Commission canadienne des transports | Canadian Transport Commission

PRÉFACE

Vous trouverez ci-joint une copie des textes présentés lors de deux séminaires tenus au printemps de 1982 aux commissaires et aux membres du personnel de la Commission canadienne des transports. La Commission met ces documents à la disposition du public en tant que contribution aux discussions sur l'élaboration de la politique et de la réglementation des transports au Canada.

Le conférencier au premier de ces séminaires, M. W.G. Waters II, professeur à l'Université de la Colombie-Britannique, a parlé des développements récents dans le domaine de l'économique de la réglementation des transports. Les progrès de la théorie économique touchant le rôle de la concurrence dans le marché des transports ont fait ressortir un certain nombre de situations complexes et ont donné lieu à de nouvelles interprétations et à des changements d'accentuation, le tout menant à une conception nouvelle du rôle du gouvernement sur le marché.

M. M. Florian, professeur au Centre de recherche sur les transports de l'Université de Montréal, explique le rôle des modèles de réseau dans la planification des transports et leur application interactive ou graphique. Ce séminaire traite en particulier des éléments des modèles de réseau utilisés dans la planification des transports; il passe en revue les propriétés structurales de ces modèles ainsi que les méthodes les plus fréquemment employées pour leur solution et donne un aperçu des applications actuelles et potentielles de ces modèles.

Les opinions exprimées dans ces documents n'engagent que leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues de la Commission canadienne des transports.

Le vice-président à la recherche,

Yves Dubé

Canadä

TABLE DES MATIÈRES

PROGRÈS RÉCENTS EN ÉCONOMIQUE
DE LA RÉGLEMENTATION DES TRANSPORTS 1
par W.G. Waters II

LES MODÈLES DE RÉSEAU DANS
LA PLANIFICATION DES TRANSPORTS ET
LEUR APPLICATION INTERACTIVE OU GRAPHIQUE 55
par Michael Florian

PROGRÈS RÉCENTS EN ÉCONOMIQUE

DE LA RÉGLEMENTATION DES TRANSPORTS

Traduction de l'allocution prononcée

par

W.G. Waters II,
Faculté de commerce et d'administration des affaires,
Université de la Colombie-Britannique

PROGRÈS RÉCENTS EN ÉCONOMIQUE DE LA RÉGLEMENTATION DES TRANSPORTS*

Divers aspects de l'économique des transports ont fait jusqu'ici l'objet de préoccupations constantes. Naturellement, rien n'est pour ainsi dire constant, mais nombre de questions et de controverses ont des résonances familières, notamment les estimations de coûts en présence de coûts communs et d'indivisibilités multiples, l'effet favorable ou nuisible d'un ensemble particulier de règles sur l'efficacité économique, la tentative d'estimations de prix efficaces attachés aux biens publics, etc. Les principes sous-jacents à ces débats, ainsi qu'à d'autres, reposent sur un fondement solide: la théorie microéconomique et l'application de l'économique du bien-être, en dépit des modifications ou d'une insistance particulière sur les caractéristiques saillantes de la fourniture des services de transport, notamment les produits multiples et coûts communs, les indivisibilités, les biens non entreposables, les rendements croissants éventuels, les effets externes, etc. La théorie se raffine et les méthodes empiriques progressent régulièrement. Toutefois, ces raffinements et les améliorations apportées aux techniques d'analyse n'ont pas suffi à modifier fondamentalement notre compréhension du fonctionnement des marchés des transports ni nos opinions à cet égard. En l'absence d'effets externes, de biens publics ou de quelque autre "défaut du marché", la concurrence est généralement considérée comme le moyen idéal de réaliser une répartition efficace des ressources. En cas de monopole naturel, le gouvernement peut être appelé à intervenir afin de simuler les effets de la concurrence (égalité entre prix et coût marginal, etc.).

---

* Étude accompagnant un séminaire tenu le 30 avril 1982 à la Commission canadienne des transports.

L'auteur sait gré à ses collègues, Kenneth J. Button, T.D. Heaver et Steven A. Morrison, de lui avoir fourni des commentaires utiles au cours d'entretiens. Il remercie également Ken Freeman pour sa précieuse collaboration à la recherche. Naturellement, l'auteur assume l'entière responsabilité de l'analyse et des opinions qui y sont exprimées.

Au cours des dernières années, certains raisonnements théoriques ont été avancés pour mettre en cause notre confiance traditionnelle dans la performance économique de la concurrence sur les marchés du transport. Paradoxalement, d'autres thèses donnent à entendre que la réglementation pourrait se révéler inutile même en présence d'un monopole. Comme toute modification d'importance apportée à un ensemble de théories, les nouveaux développements ne démontrent pas que les théories antérieures sont fausses en soi, mais signalent la complexité, les diverses interprétations possibles et répétitions qui, néanmoins, mènent à des conclusions différentes. Il est vraiment trop tôt pour confirmer si ces développements sont aussi révolutionnaires que le prétendraient quelques économistes. Certains de ces arguments signalent une intervention accrue du gouvernement dans l'économie de marché. Il est ironique de voir surgir de telles conclusions au moment même où les économistes, après avoir critiqué pendant des décennies l'intervention gouvernementale, voient enfin leurs remontrances se concrétiser par l'amorce d'un mouvement contraire en Amérique du Nord.

L'objet de la présente étude est de résumer certaines analyses théoriques récemment parues dans des revues économiques d'importance se rapportant directement à la réglementation du transport. La théorie va souvent de pair avec les mathématiques pour arriver à une formulation précise. Cette rigueur de raisonnement est nécessaire et adéquate pour déduire avec précision les effets des postulats théoriques. Mais il y a loin de la précision et de l'élégance des modèles théoriques au "monde réel" plus complexe que représentent la prise de décision et la réglementation en matière de transports. La présente étude essaie d'expliquer de façon relativement concise et simple certaines de ces récentes théories situées à la frontière de la recherche économique et de présenter leurs incidences potentielles sur la réglementation des transports.

Avant de nous lancer dans le vif du sujet, quelques remarques complémentaires s'imposent en guise d'introduction. Nombre de "théories récentes" pourraient se prêter à l'étude, mais je ne peux en aborder que quelques-unes. Il est peut-être utile d'expliciter en premier lieu ce que j'entends par domaines importants et forces motrices de la réglementation de l'industrie des transports, c'est-à-dire de déterminer les aspects de la

théorie économique les plus pertinents au sujet que nous allons traiter. En second lieu, un certain nombre de ces développements sont importants et intéressants mais ne peuvent être étudiés dans le cadre du présent exposé. Je voudrais au moins mentionner quelques-uns de ces sujets avant d'étudier en profondeur les autres aspects retenus.

A. Qu'est-ce que l'économique des transports?

Je pourrais commencer par dire banalement que l'économique des transports se résume aux faits et dires des économistes oeuvrant dans ce domaine. Un tel truisme engloberait toute une gamme de théories et d'approches économiques allant des efforts les plus pratiques de prévision et d'attribution des coûts aux analyses et estimations rigoureuses de systèmes d'équations. Je m'intéresse aujourd'hui aux aspects plus conceptuels de l'économique des transports, mais je promets de ne pas chercher à vous éblouir avec des systèmes d'équations.

Il est intéressant de constater que les aspects importants de l'économique des transports diffèrent quelque peu d'un pays à l'autre. Au Royaume-Uni, l'intérêt semble porter principalement sur la fixation des prix et la détermination des règles d'investissement pour le secteur public et sur les sujets connexes. Les revenus et rapports anglais font grand état de l'évaluation économique des projets de transports publics (études coûts-avantages sociaux) et de la fixation de prix convenables malgré les effets externes et les effets de substitution que présentent les modes de transport. Le thème principal est certes le transport urbain, mais le déplacement interurbain à forte densité retient aussi l'attention. Certains sujets en découlent, notamment l'estimation de la demande de transports, les élasticités croisées des moyens de transport et les élasticités par rapport au temps de déplacement et aux variables qualitatives connexes. L'estimation de la valeur du temps de déplacement a fait l'objet d'une attention particulière. Le sujet est d'importance pour estimer les divergences modales, car l'épargne de temps constitue un avantage économique majeur de la plupart des projets de transports publics. Un éminent

économiste anglais soutient même que l'estimation de la valeur du temps de déplacement est l'une des questions les plus importantes de l'économique des transports (Sharp, 1973).

En Amérique du Nord, surtout aux États-Unis, l'économique des transports s'est d'abord et surtout concentrée sur les questions de réglementation. D'une manière plus générale, il semble que les thèmes principaux se sont concentrés sur la réalisation de l'efficacité des entreprises à produits multiples, que ce soit par l'intermédiaire d'un régime concurrentiel ou par la substitution d'une réglementation au libre fonctionnement du marché. La réglementation porte essentiellement sur les contrôles de prix et (ou) d'entrées. Les textes de nature économique portant sur les transports examinent l'attribution des coûts et la fixation des prix en présence de coûts communs, la nécessité d'une réglementation en situation de monopole naturel ou d'autres marchés de concurrence imparfaite et, partant, les directives visant la fixation de prix convenables. Les études nord-américaines portent normalement une très grande attention aux procédures de réglementation ayant cours et à leurs lacunes sur le plan économique. L'évaluation des investissements publics fait habituellement l'objet de beaucoup moins d'attention et se concentre essentiellement sur l'établissement des tarifs imposés aux usagers de services publics.

Les particularités de l'économique des transports qui ont toujours retenu l'attention ont généralement été les mêmes au Canada et aux États-Unis, mais, au Canada, on attache une plus grande importance au rôle de promoteur du gouvernement au chapitre des modes de transport. Ce comportement n'a rien d'étonnant étant donné la présence dominante du gouvernement canadien dans ce domaine, présence qui s'est imposée en raison de l'étendue géographique du pays et de l'importance du transport comme facteur de l'union politique.

Les spécialistes australiens de l'économique des transports partagent l'intérêt que porte l'Angleterre à l'évaluation des prix et aux règles d'investissement et l'attention manifeste qui est accordée au transport urbain. Mais l'Australie partage aussi les préoccupations du Canada à l'égard du rôle propice des transports dans le développement

économique (bien que l'Australie insiste davantage sur le transport maritime et le Canada, traditionnellement, sur le transport par chemin de fer).

Je connais moins bien l'économique des transports et les politiques de l'Europe en la matière, mais les Européens semblent suivre la ligne de conduite adoptée en Angleterre: attacher beaucoup d'importance à la fixation des prix et aux règles d'investissement en ce qui concerne le secteur public. Les pays européens se sont aussi préoccupés des incidences de réglementations diverses et d'autres interventions gouvernementales dans le domaine des transports ainsi que des problèmes inévitables liés à une intégration économique plus poussée. De plus, les pays européens peuvent avoir une tradition politique plus ancrée qui les pousse à insister sur les forces politiques et sociales et leur incidence sur l'économie.

Parmi les "théories récentes", j'insisterai sur l'orientation de l'économique des transports qui, à mon avis, est traditionnelle en Amérique du Nord. Ces questions découlent de l'intérêt que suscite la relation entre la fixation des prix et l'efficience économique dans les entreprises à produits multiples qui connaissent des structures de marché différentes. Les mérites relatifs de la libre concurrence par rapport à ceux de la réglementation pour réaliser l'efficience constituent notre principale préoccupation.

B. Progrès récents en économique des transports non abordés

Nombre de sujets potentiels pourraient être étudiés sous cette rubrique, beaucoup trop cependant pour un seul colloque. Il est toutefois nécessaire de signaler au moins certains thèmes qui ne seront pas revus dans le présent texte.

Nous pourrions mentionner en premier lieu les importants progrès réalisés au niveau des méthodes empiriques depuis une décennie ou deux. Je pense en particulier à deux progrès. Le premier est la formulation et l'estimation des fonctions de coûts des entreprises à produits multiples, susceptibles de refléter les relations de coûts complexes qui existent entre différentes sorties de produits, ce qu'on appelle les formes flexibles. Ces

techniques économétriques plus recherchées sont déjà largement utilisées; les estimations de la productivité totale des facteurs dans les secteurs canadiens des chemins de fer et du transport aérien sont, entre autres, deux exemples qui nous touchent particulièrement [1].

Le deuxième progrès empirique d'importance porte sur l'estimation de la demande. Je pense d'abord au travail considérable effectué dans l'estimation du choix du mode de transport, principalement des passagers. L'application de modèles logarithmiques multinominaux et de techniques semblables a sans contredit aidé à préciser la signification empirique de l'épargne de temps et d'autres variables qualitatives essentielles à l'explication du choix du mode de transport. Ces études sont particulièrement utiles pour empêcher la formation d'investissements inadéquats dans les transports urbains.

Les techniques d'évaluation des investissements gouvernementaux dans les modes de transport ont aussi progressé. Je pense à l'analyse coûts-avantages sociaux, par exemple, et aux techniques de planification et d'évaluation connexes. Personne ne pourrait prétendre que cette analyse est devenue une science, mais les techniques sont de plus en plus utilisées et nous espérons tous qu'elles faciliteront, ou tout au moins clarifieront les évaluations de projets, les comparaisons et la répartition du budget [2]. Ces techniques n'ont pas connu de reformulations radicales ces dernières années. Des innovations ou prolongements d'importance qui viennent à l'esprit, on peut mentionner l'attention croissante qui est accordée aux procédures d'évaluation des investissements, où les divergences prix-coûts (c'est-à-dire les questions de "second rang") et les effets croisés des différentes demandes ne sont pas négligés. Au Canada, l'analyse de Borins (1978) est une référence.

La fixation optimale des prix des "services congestionnés" et la détermination de leur investissement sont d'autres thèmes importants de l'économique des transports. Le concept est connu depuis quelque temps. Les utilisateurs de services congestionnés prennent en considération leur temps et les désavantages causés par la congestion, mais oublient les coûts équivalents qu'ils imposent aux autres. La principale recherche en la

matière a porté sur le transport urbain [3], mais le sujet a également été exploré pour le transport aérien (Carlin et Park, 1970) et le transport maritime (Vanag, 1977). Singapour a adopté une forme de fixation des prix pour le transport routier et il existe un intérêt manifeste à Kuala-Lumpur et à Londres. Les principaux progrès réalisés dans ce domaine ont été l'inclusion de la congestion et de la non-optimalité des prix à différents modes de transport lors de l'analyse des politiques. Dans une optique connexe, il faut signaler la formulation de règlements pour optimiser l'investissement dans des services congestionnés en l'absence de prix congestionnés [4].

Les prix de "second rang" ont fait l'objet de nombreuses études. La règle de base des manuels, P = MC, soit la fixation des prix de "premier rang", suppose que les prix sont égaux aux coûts marginaux ailleurs dans l'économie. Mais, c'est bien connu, les prix s'éloignent des coûts en raison de divers facteurs comme les taxes, les effets externes, les monopoles, etc. Dans ces circonstances, l'égalisation des prix aux coûts marginaux ne représente pas la politique optimale [5]. Malheureusement, il n'existe pas de règle par excellence, universellement valable, qui permettrait de fixer les prix de second rang. La politique appropriée est fonction des différences entre les prix et les coûts et des diverses élasticités de l'offre et de la demande propres à chaque situation. Certaines directives se sont toutefois imposées; j'en relèverai quelques-unes plus loin dans le présent exposé. Une méthode particulière de fixation des prix de second rang a dernièrement retenu beaucoup d'attention. Elle porte sur les règles de l'efficacité en matière de fixation des prix en présence d'une contrainte imposée par le revenu, par exemple, comment éviter un déficit dans une industrie à coûts décroissants. Ce sujet sera exploré dans les pages qui suivent.

Aujourd'hui, je m'intéresse surtout aux théories récemment élaborées sur la réglementation de l'économique des transports. Mais c'est là un sujet encore trop vague. L'économique de la réglementation a suscité un vif intérêt ces dernières années, et cela, pour de bonnes raisons. Non seulement s'est-il produit des changements au niveau de la réglementation sur le plan des réformes et des révisions, mais nombre de mises au point

très intéressantes ont modifié la base de la théorie micro-économique afférente à ce sujet. Avant de revoir les articles à l'ordre du jour, j'aimerais attirer votre attention sur quelques théories récentes relevant de l'économique de la réglementation propre au transport qui ne sont pas étudiées au cours du présent exposé.

Il me faut d'abord vous rappeler l'immense documentation traitant des incidences logiques du tarif de base -taux de rendement de la réglementation, communément appelé "modèle AJ" suite à l'étude de Averch et Johnson (1962). La possibilité que le rendement de la réglementation puisse amener une utilisation inefficace du capital était depuis longtemps perçue; c'est donc dire que les résultats du modèle AJ n'avaient rien d'étonnant, mais que ce simple modèle et ses incidences ont permis une meilleure compréhension des sources et des genres de déviations capitalistes en raison du taux de rendement de la réglementation [6].

Nombre d'études ont analysé les coûts économiques d'une réglementation inefficace. Dans l'ensemble, les concepts et les méthodes d'analyse n'étaient pas nouveaux, malgré des raffinements constants. Le progrès d'importance a été la prolifération des estimations des coûts de la réglementation [7]. Les résultats de ces diverses études influent sur le mouvement de non-intervention de ces dernières années.

L'attention accordée aux différentes théories relatives à la réglementation a constitué un autre progrès d'importance. Je pense à ce qu'on appelle la théorie de "l'accaparement des marchés" et aux théories plus raffinées de l'école positiviste pour ce qui a trait au processus de la réglementation (Posner, 1974; Stigler, 1971). Dans la même optique, nous pouvons probablement nous attendre à des études plus poussées sur les modifications apportées aux réglementations, puisque les spécialistes mènent des études et tentent d'expliquer ce qui intervient sous différents régimes de réglementation en Amérique du Nord (y compris la non-intervention à divers degrés). C'est dire que certaines réglementations ont pris place et que nous aurions intérêt à étudier les faits à mesure que les réglementations changent et que les marchés et les entreprises s'y adaptent. La théorie des "marchés contestables" est issue des observations

et des analyses portant sur l'à-propos de substituer la concurrence à la réglementation. Il semble prudent d'affirmer que, selon la conjoncture, l'absence d'intervention pourrait ne pas être une panacée, comme le croiraient certains spécialistes. Cette idée m'amène à certains sujets que j'aimerais présenter ajourd'hui.

Le premier, résumé en quelques mots, porte sur l'efficacité économique et l'équilibre d'un marché où la concurrence se fonde sur la qualité. Certains types de réglementation peuvent se révéler supérieurs à la libre concurrence lorsque la différenciation des produits entre en ligne de compte. Le deuxième point important à l'ordre du jour doit être beaucoup plus élaboré. Il porte sur diverses interprétations et incidences des coûts décroissants. Ces coûts, représentatifs du "monopole naturel", ont longtemps constitué l'une des raisons qui incitent le gouvernement à exercer un certain contrôle au lieu de compter sur le libre fonctionnement du marché. Depuis peu, la documentation économique attire l'attention sur des sources de coûts décroissants différentes de celles qu'on étudie ordinairement et aussi sur diverses complexités entourant les coûts décroissants dans les entreprises à produits multiples. En l'occurrence, d'autres conclusions sur le rôle adéquat du gouvernement face aux mécanismes de marché se précisent.

C. Efficacité du marché en situation de concurrence qualitative

Ce sujet est à peine abordé dans ces pages. Il porte sur l'efficacité économique du marché concurrentiel en présence d'une différenciation de qualité entre les services offerts. Le modèle type de concurrence parfaite exposé dans les manuels suppose que les services offerts sont homogènes. Par ailleurs, la nature même du transport met en cause des services différenciés. L'offre de transport a lieu à des moments imprévus et prend la forme de capacité indivisible. Au contraire, la demande de transports a tendance à s'élever de façon continue dans un intervalle de temps donné et le volume de la demande correspond ainsi rarement à la quantité offerte pour chaque déplacement. Les temps d'arrivée et de départ ainsi que nombre d'autres variables qualitatives différencient le mode de transport, l'entreprise et le service. Au cours des dernières

années, la performance économique de la réglementation a été fortement critiquée. Le fait de montrer que la performance économique pourrait être améliorée par l'absence d'intervention ne revient pas à prouver qu'une absence totale de réglementation est supérieure à une certaine réglementation.

Le modèle type de la concurrence monopolistique des manuels, comme celui de la concurrence parfaite, prévoit des profits nuls à l'équilibre. Toutefois, comme les produits sont différenciés, chaque entreprise n'affronte pas des courbes de demande parfaitement élastiques. Un équilibre caractérisé par des profits nuls et des courbes de demande décroissantes signifie que l'entreprise se trouve sur la partie décroissante de sa courbe de coût moyen. C'est dire qu'une certaine capacité excédentaire existe à l'équilibre. Ce résultat est expliqué dans tout manuel de base de micro-économie. La libre concurrence, toutefois, ne garantit pas une répartition optimale des ressources lorsque les produits sont différenciés; il y a au moins la possibilité qu'une certaine intervention idéale du gouvernement arrive à améliorer la situation.

Plus intéressantes encore sont les complications qu'entraîne l'arbitrage prix-qualité. Diverses combinaisons prix-qualité sont réalisables en présence d'un même niveau de profits (nuls). La concurrence conduira-t-elle à une combinaison socialement optimale? Les analyses de l'industrie américaine du transport aérien, auparavant réglementée, sont instructives. La réglementation traditionnelle de la Civil Aeronautics Board (CAB) contrôle les prix et l'entrée. Les prix sont fixés dans l'espoir de soutenir une industrie financièrement viable, mais les compagnies aériennes entreraient en concurrence sur le plan de la qualité, qui porte surtout sur la fréquence des vols (c'est-à-dire la taille de la flotte). Cette situation pourrait s'expliquer simplement par la nature concurrentielle de l'industrie, mais aussi par la déviation capitalistique que renferme implicitement le taux de rendement de la réglementation (le modèle AJ susmentionné). Quelle que soit l'explication retenue, le résultat a été une élévation des prix, une fréquence supérieure des vols, et des coefficients de remplissage plus faibles qu'ils ne l'étaient à l'optimum social (Douglas et Miller, 1974; De Vaney, 1975). Ces études, celle de

Jordan (1970) et bien d'autres ont conclu que l'absence d'intervention serait alors supérieure à la politique de la CAB. Mais ces analyses comparaient les résultats concurrentiels à un type particulier de réglementation. Les auteurs, pour la plupart, n'ont pas indiqué si la libre concurrence est supérieure à une <u>certaine</u> forme de réglementation.

Panzar (1979) aborde effectivement ces questions. Il établit un modèle simple du marché aérien. Les coûts des lignes aériennes sont supposés constants. La demande est fonction des variables prix et qualité (fréquence et coefficients de remplissage). Le prix total du voyage doit comprendre la valeur marginale des retards que les passagers s'imposent mutuellement (qui peut être nulle si les marchés sont denses). L'auteur suppose que les temps de départ sont uniformément étalés sur la journée [8]. L'ensemble du marché et le marché représenté par chaque ligne aérienne dépendent de la fréquence des vols. Il constate qu'une entrée concurrentielle entraînerait un excès des fréquences, donc des prix plus élevés, une fréquence supérieure (et des coefficients de remplissage plus faibles) par rapport à un niveau socialement optimal. Une réglementation idéale consisterait à fixer les prix au niveau de l'optimum social et à permettre une entrée libre. Des profits nuls à l'équilibre concurrentiel empêchent les entreprises d'investir une capacité supplémentaire, donc de dépasser la fréquence optimale [9].

Schmalensee (1977) a obtenu des résultats semblables. Il va même plus loin en repérant des situations d'où pourrait émerger une forme de concurrence destructive. Ce serait le cas si les rendements étaient croissants sur les différentes parts de marché en présence d'une fréquence progressive des vols, mais si les rendements étaient décroissants sur le marché dans son ensemble. Les entreprises sont incitées à surinvestir, le marché leur semblant plus attrayant qu'il ne l'est en réalité. Schmalensee, comme Panzar (1979), conclut qu'une réglementation idéale pourrait améliorer les effets d'un marché concurrentiel.

La signification de ces analyses théoriques est controversée. Ces analyses supposent l'existence d'un organisme de réglementation très éclairé et puissant et, en même temps, peu coûteux. Les modèles présentés ne sont

donc pas très utiles pour déterminer: (1) si, en pratique, la réglementation peut vraiment satisfaire aux exigences théoriques, et (2) si l'amélioration de la répartition des ressources justifie les coûts de la réglementation. Ce sont là des questions empiriques d'importance que néglige la théorie.

Néanmoins, ces exercices théoriques nous mettent effectivement en garde contre la croyance générale que les résultats obtenus en régime de concurrence sont nécessairement supérieurs à ceux d'une réglementation adéquate.

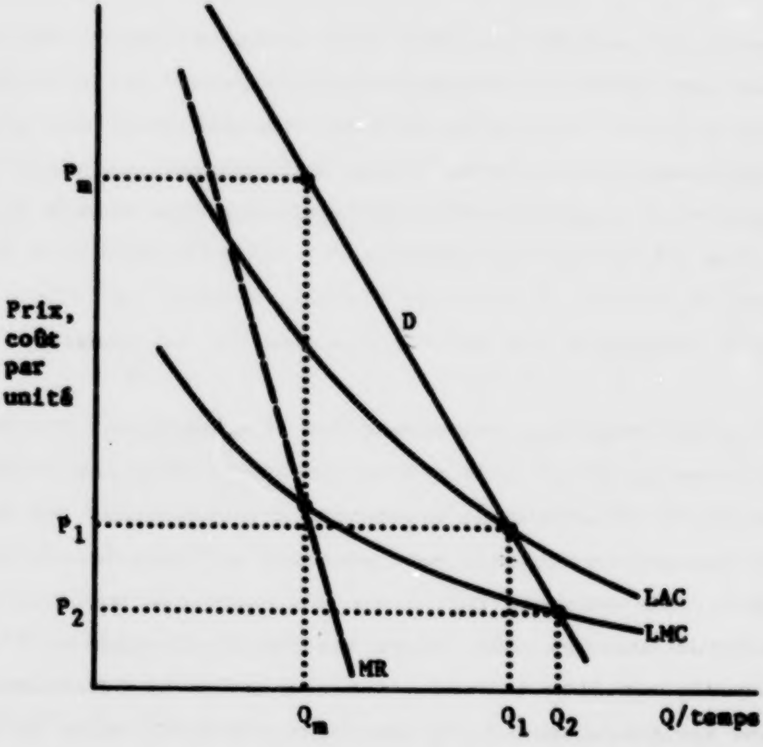
D. Rendements croissants et incidences sur la politique

Les rendements croissants ou coûts unitaires décroissants ont été pendant longtemps une des raisons d'être de la réglementation [10]. C'est ce qu'on appelle le monopole naturel comme le montre la figure 1. Au fur et à mesure que la demande augmente, les coûts moyens diminuent. Nous pensons surtout aux entreprises qui exploitent à une grande échelle comme les entreprises spécialisées dans l'énergie électrique, les communications ou, traditionnellement, les chemins de fer. Mais le concept de monopole naturel s'applique aussi bien aux petites entreprises, par exemple, au service d'autobus ou de camionnage offert à une petite communauté.

Le concept de monopole naturel est important en matière de réglementation, car la demande est insuffisante pour soutenir maints concurrents. La réglementation est donc nécessaire pour empêcher le monopoleur de demander des prix excédant les coûts marginaux, comme l'enseigne la théorie traditionnelle. La figure 1 indique que le monopoleur demanderait le prix Pm pour la quantité Qm. Cette situation a deux incidences sur la politique gouvernementale: (1) une répartition du revenu est susceptible de se produire, car le monopoleur peut s'enrichir aux dépens des consommateurs, et (2) la répartition des ressources est inefficace, car, comme le prix excède le coût marginal, les acheteurs qui sont disposés à payer des prix supérieurs aux coûts ne trouvent pas de service. Cette dernière incidence a fait l'objet d'une préoccupation majeure au cours de l'analyse économique des politiques de réglementation.

Figure 1

MONOPOLE NATUREL ET PROBLÈME DE L'INDUSTRIE À COÛTS DÉCROISSANTS



La politique optimale ne tient pas compte des questions d'optimum de second rang et doit utiliser la réglementation pour simuler les résultats des marchés concurrentiels, entre autres, la fixation des prix au coût marginal. Cette situation, c'est bien connu, donne lieu au "dilemme des industries à coûts décroissants" selon lequel la fixation des prix au coût marginal entraîne un déficit financier. C'est dire que le monopoleur qui réalise des profits devient financièrement insolvable. La fixation des prix au coût moyen permet à l'entreprise de ne faire ni pertes ni profits, mais le dilemme du bien-être n'est pas pour autant réglé du fait que les ressources ne sont pas réparties efficacement.

Tout ce qui précède est déjà bien connu et demeure valable jusqu'à présent. Quelques nouvelles conceptions de la nature des rendements croissants et de leurs incidences ont toutefois été avancées. Certaines de ces conceptions sont indépendantes l'une de l'autre alors que d'autres sont reliées. Le premier sujet abordé ci-dessous peut être étudié indépendamment des autres; les autres sont corrélatifs.

1. Rendements croissants des entrées fournies par les usagers [11]

Une caractéristique importante des transports est le rôle de nature dualiste des usagers, en ce sens que ce sont aussi bien les consommateurs que les producteurs de moyens de transports qui supportent les coûts de l'attente et des autres inconvénients associés aux transports. Le coût total des transports comprend tant les coûts supportés par le producteur des modes de transport que les coûts supportés par le passager ou l'affréteur. Les études traditionnelles de rendements croissants et décroissants portent sur les coûts des producteurs. Il est aussi possible, et en fait probable, que les rendements relatifs aux entrées fournies par les usagers soient croissants.

La demande de transports est continue dans un intervalle de temps donné; par contre, en raison des indivisibilités et (ou) de l'économie de la taille des véhicules, l'offre prend place de façon discontinue. Les usagers d'un service planifié se heurtent aux différences entre les départs préférés et les départs disponibles. Il existe une période d'attente due à

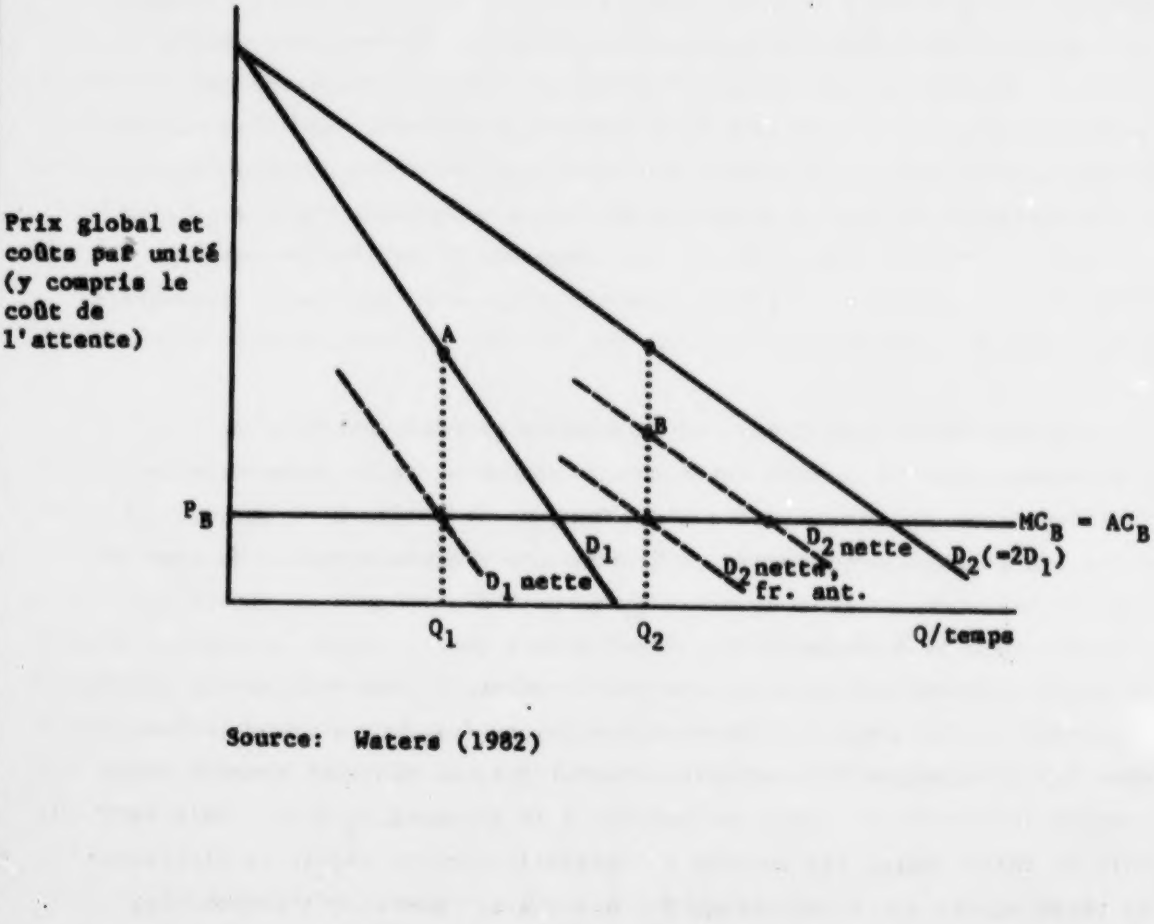
l'intervalle entre les départs et les arrivées [12]. Lorsque le volume de la circulation augmente, le producteur met sur le marché un nombre accru de véhicules, ce qui améliore la fréquence du service. Les progrès réalisés dans l'économie de temps réduisent les retards ou le temps d'attente que doivent supporter les usagers. Les coûts totaux de l'attente n'augmentent donc pas proportionnellement aux coûts du producteur à mesure qu'augmente le nombre de passagers.

Un exemple illustrera les rendements croissants de l'attente et leurs incidences sur la fixation des prix. Prenons le cas d'une demande générale de services d'autobus, c'est-à-dire le nombre de voyages définis par rapport à la volonté de payer, que ce soit en dépenses pécuniaires ou en coûts en matière de temps supportés personnellement. Supposons que la valeur du temps soit constante et linéaire. L'ensemble des coûts sociaux marginaux d'un service d'autobus est déterminé par les coûts supportés par l'entreprise de transport, supposés constants par voyage $MC_B = AC_B$, plus les coûts d'attente supportés par les usagers. La taille des autobus, le temps de déplacement et d'autres caractéristiques du système de transports sont supposés constants.

La figure 2 fait état de la demande générale initiale D_1. La courbe exprimant la demande nette ou la volonté nette de payer représente la demande perçue par l'entreprise d'autobus, c'est-à-dire le programme qui relie les passagers aux tarifs payés pour une fréquence donnée du service. L'équilibre normal est la quantité Q_1 au prix d'autobus d'équilibre P_B. Supposons que la demande double, c'est-à-dire que la courbe se déplace vers la droite, entraînant un doublement de la quantité pour tout niveau général des prix. Si le temps d'attente ne change pas (si deux autobus roulent en même temps plutôt qu'à intervalles déterminés), la nouvelle demande nette coupera la courbe des coûts des autobus à la quantité Q_2 [13]. Mais le fait de faire rouler les autobus à intervalles précis réduit la différence de temps écoulé entre le passage des autobus et, partant, l'attente des usagers (en supposant que les usagers arrivent au hasard aux arrêts d'autobus) [14]. Le coût total par parcours des services d'autobus (coût du déplacement plus la valeur de l'attente) a diminué, passant du niveau représenté par le point A au niveau représenté par le point B qui reflète

Figure 2

RENDEMENTS CROISSANTS PROVENANT DE LA RÉDUCTION DE L'ATTENTE DES USAGERS DES SERVICES D'AUTOBUS



Source: Waters (1982)

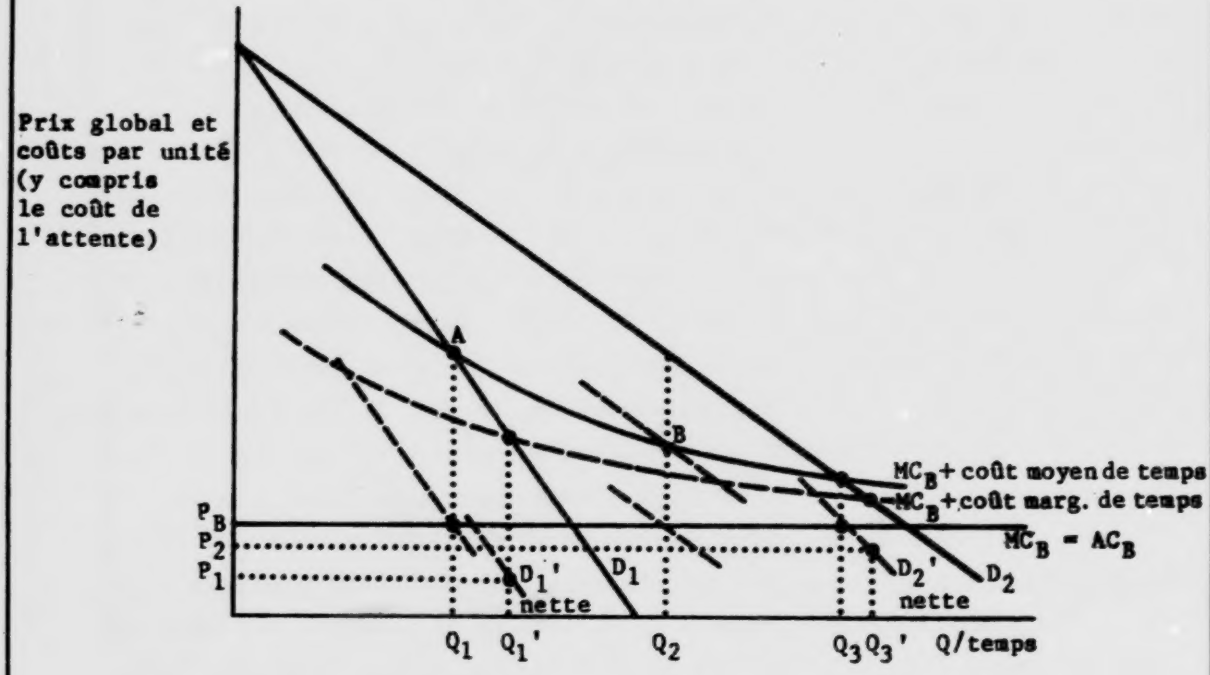
les rendements croissants. À Q_2, la volonté de payer dépasse les coûts unitaires totaux (B) et il serait optimal pour l'entreprise de prendre une certaine expansion.

Il faut remarquer que les usagers tiennent effectivement compte du temps d'attente. La réduction de la période d'attente du point A au point B se traduit directement par une disposition accrue à payer le tarif demandé. Mais l'histoire ne s'arrête pas là. Les usagers tiennent compte de leur propre temps d'attente (et du tarif payé) en choisissant d'emprunter ou non ce mode de transport, choix indiqué par les points A et B de la figure 2. Étant donné que le résultat collectif d'une utilisation accrue du service d'autobus correspond à une fréquence également accrue en fonction de l'expansion de l'entreprise, un changement du temps total de l'attente imposée à l'ensemble des usagers à mesure que le produit augmente n'est pas équivalent au temps moyen envisagé par chaque usager. La courbe de coût marginal social du temps passé à l'attente doit se trouver en-dessous de la courbe moyenne passant des points A à B. Chaque usager estime que le temps d'attente (fréquence des autobus) est fixe. Si, pour une seule personne, l'incidence de la fréquence est jugée sans importance, il en va autrement au niveau du résultat collectif. La fréquence augmentera en fonction de l'utilisation et du nombre croissant de véhicules requis. Les gens ne tiennent pas compte de cet effet externe positif qu'est la réduction du temps d'attente pour l'ensemble des usagers. Pour réaliser l'optimum social, il faut inciter les usagers de ce mode de transport à envisager les coûts marginaux réels de leur décision plutôt que de considérer uniquement leurs coûts personnels en termes de temps et d'argent. Pour ce faire, il faut réduire le tarif des autobus d'un montant égal à l'écart entre le coût moyen et le coût marginal en termes de temps social. L'effet externe associé aux rendements croissants est le temps passé à l'attente, mais cet effet est rectifié par l'ajustement des dépenses monétaires des usagers.

Ces considérations sont illustrées à la figure 3 qui, en fait, est une modification de la figure 2 pour indiquer les coûts sociaux, moyens et marginaux. L'optimum est réalisé au point où le niveau général des prix est égal au coût marginal social. À la demande originale D_1 correspond la sortie de produits optimale Q_1' au lieu de Q_1. À la demande D_2

Figure 3

PRIX ET SORTIES DE PRODUITS OPTIMAUX EN PRÉSENCE DE RENDEMENTS CROISSANTS PROVENANT DE LA RÉDUCTION DE L'ATTENTE



Source: Waters (1982)

correspond la sortie de produits optimale Q_3' au lieu de Q_3 au prix P_2. Remarquons que la volonté nette de payer (demande perçue par l'entreprise d'autobus) se déplace vers l'extérieur à mesure que le produit s'amplifie, ce qui traduit une amélioration de la fréquence résultant de la mise en service d'un plus grand nombre d'autobus. Le prix optimal pour la demande D_1 est P_1. Il est inférieur au tarif d'autobus d'équilibre P_B (égal à MC_B) d'un montant égal à la différence entre le coût social moyen en termes de temps et le coût marginal.

La figure 3 indique que les coûts de temps moyens et marginaux convergent vers zéro à mesure que s'annule l'attente (ou que les trajets d'autobus deviennent continus). La pente adoucie de ces courbes lorsqu'elles approchent de zéro reflète les rendements décroissants dus à l'accroissement supplémentaire du nombre de véhicules (fréquence). La subvention par unité (différence entre les coûts de temps moyens et marginaux) est donc plus élevée dans le cas d'une circulation moindre. Cette conclusion laisse entendre que les subventions par unité seraient plus importantes pour les routes moins achalandées, comme les routes empruntées aux heures creuses et les chemins de raccordement, que pour les grandes voies (Mohring, 1972; Jansson, 1980) et que seraient utilisés des autobus plus petits que les véhicules couramment utilisés (Jansson, 1980).

Avant d'aborder un autre sujet, je dois insister sur le fait que cette dernière discussion portait exclusivement sur le temps d'attente. On peut relever nombre de sources de retards et de coûts supportés par les usagers qui provoquent aussi des effets externes, dont quelques-uns sont négatifs, par exemple, les retards dus aux congestions et aux foules. Ces derniers prennent de l'importance sur les routes très fréquentées, c'est-à-dire sur celles où les rendements croissants précédemment étudiés ne sont sans doute pas aussi importants. Les producteurs aussi connaissent possiblement des rendements croissants (c'est-à-dire les sources traditionnelles de coûts décroissants). Certains facteurs figurent ainsi dans la fixation des tarifs optimaux pour les services de transport planifiés et ce n'est pas nécessairement le cas où domineront les rendements croissants. La fixation des prix au niveau optimal pourrait aussi bien conduire à un surplus qu'à un déficit financier [15].

2. Coûts décroissants et entreprise à produits multiples

Une importante caractéristique de l'industrie des transports réside dans le fait qu'elle se compose d'entreprises à produits multiples, dans une proportion sans doute inégalée dans les autres industries. Malgré cette importance, notre compréhension formelle des fonctions de coûts des entreprises à produits multiples a été plutôt faible, du moins jusqu'à ce que les économistes entreprennent un examen rigoureux des propriétés de ces fonctions. Les dernières formulations (Baumol et autres) sont fort intéressantes et ont donné naissance à diverses investigations. À mon avis, certaines de ces conclusions ne font que formuler des connaissances intuitives ou officieuses de ce qu'est l'économique des transports depuis nombre d'années. Les termes "économies de diversification" (Panzar et Willig, 1975 et 1981) et "convexité trans-rayon" (Baumol, 1977) désignent tout simplement ce que les économistes spécialisés en transports appellent depuis longtemps des coûts communs. (Toutefois, ces économistes ont employé le terme de façon ambiguë, comme je l'ai indiqué dans mon étude de 1976.)

L'expression appropriée pour désigner, en ce qui concerne le monopole naturel, l'équivalent des produits multiples d'un produit unique est une "fonction de coût sous-additive", c'est-à-dire:

$$C(X1, X2, \ldots Xm) < C(X1) + C(X2) + \ldots + C(Xm).$$

Cette fonction signifie qu'il est possible de produire à des coûts inférieurs si la production se fait en bloc plutôt que de façon isolée. Mais la fonction de coût à produits multiples peut comprendre des relations croisées très complexes parmi les coûts et les combinaisons diverses de produits. La fonction de "sous-addition stricte" est l'analogie du monopole naturel qui fabrique un seul produit. C'est là que se manifestent les rendements croissants des expansions équiproportionnelles de toute combinaison précise de produits et que, pour tout niveau de dépenses donné, une production en bloc est plus fructueuse qu'une production isolée moyennant les mêmes dépenses. Pour tout ensemble de produits, la fonction de coût devrait ressembler à celle d'une industrie traditionnelle à coûts décroissants. La figure 4 en fait état. Baumol (1977) dénomme ce phénomène

la "sous-addition du rayon" ou "rayon de coûts moyens décroissants" (Baumol, Bailey et Willig, 1977). L'autre caractéristique des coûts est leur complémentarité à la production. Pour Baumol, il s'agit de "convexité trans-rayon", comme l'indique la figure 5a. Il est moins onéreux de produire en bloc une combinaison linéaire de deux produits (ou davantage) que de produire ces produits séparément. Sous une autre forme (figure 5b), une dépense donnée en termes de coûts peut permettre une production supérieure si celle-ci est faite en bloc et non isolément. (Depuis toujours, c'est ce que les économistes en transports entendent par coûts communs.)

Figure 4

"SOUS-ADDITIVITÉ DU RAYON" OU
"RAYON DE COÛTS MOYENS DÉCROISSANTS"

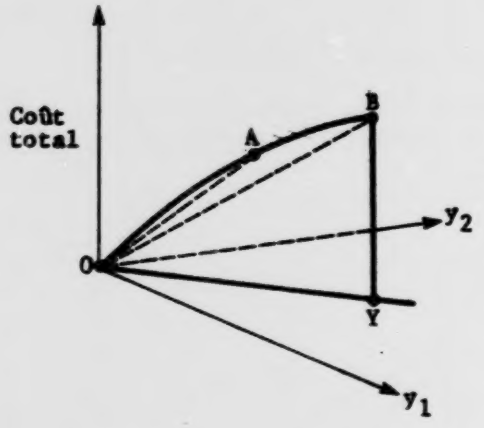


Figure 5a

CONVEXITÉ TRANS-RAYON OU
ÉCONOMIES DE LA DIVERSIFICATION

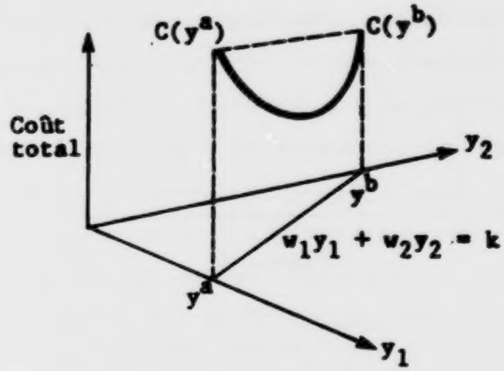
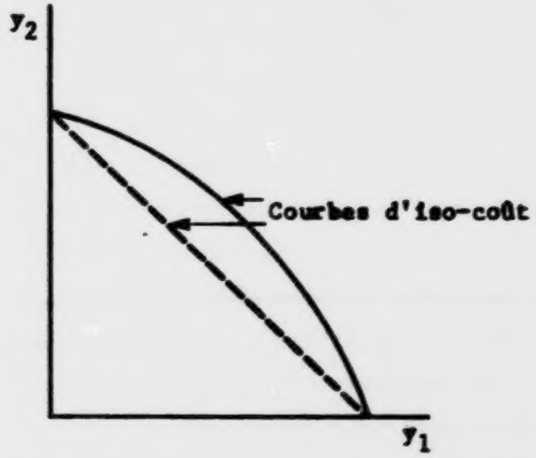


Figure 5b

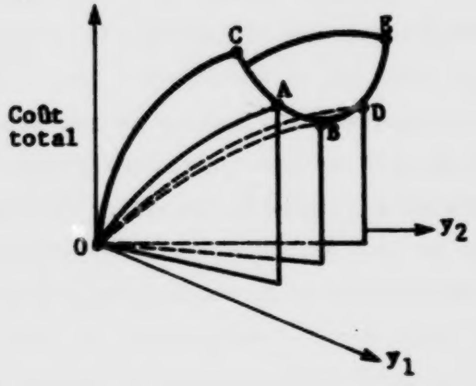
EFFETS DE LA CONVEXITÉ TRANS-RAYON OU
ÉCONOMIES DE LA DIVERSIFICATION (COÛTS COMMUNS)



La figure 6 représente une fonction de coût strictement sous-additive pour deux produits. C'est là l'équivalent des produits multiples de l'industrie traditionnelle à coûts décroissants. La fixation exacte du prix au coût marginal entraînerait des déficits financiers, comme c'est le cas pour l'entreprise qui fabrique un seul produit. Naturellement, les décisions en matière de coûts et de prix sont d'autant plus complexes lorsqu'il s'agit de résoudre les problèmes d'entreprises à produits multiples. Le monopoleur essaierait de demander des prix supérieurs au coût marginal et un organisme de réglementation tenterait d'empêcher le monopoleur de réaliser des profits de monopole. Nous étudierons bientôt plus amplement les questions de réglementation et de fixation des prix.

Figure 6

FONCTION DE COÛT STRICTEMENT SOUS-ADDITIVE



Ce qui précède porte sur la stricte sous-addition. La fonction de coût peut cependant être beaucoup plus complexe. En présence de produits multiples, les économies d'échelle peuvent être plus importantes pour certains produits que pour d'autres, ou plus considérables à certains niveaux de produits. En outre, certaines combinaisons de produits multiples peuvent être complémentaires alors que d'autres peuvent être incompatibles. L'augmentation du nombre de wagons d'un système de transport peut être plus efficace que la construction de nouvelles voies et installations; parallèlement, le fait de mêler des wagons de marchandises lents à des wagons rapides, qu'ils soient destinés au transport de marchandises ou de passagers, crée une certaine perturbation et augmente les coûts propres à un système plus homogène. De plus, les coûts complémentaires et les effets d'échelle pourraient différer selon diverses combinaisons de produits et différents niveaux de production. Il s'ensuit que les économies d'échelle ne sont ni nécessaires ni suffisantes pour faire du monopole la forme de production la moins coûteuse (Baumol, 1977, p. 809). Quant à la complémentarité dans la production (sous-addition trans-rayon), elle n'influe pas nécessairement sur les économies d'échelle.

Le message à transmettre aux agents de réglementation est que les conditions de monopole naturel ne sont pas nécessairement aussi évidentes qu'on pourrait le croire et que la manifestation d'économies d'échelle et de complémentarités des coûts pour un seul niveau et une seule combinaison de produits pourrait ne pas constituer un indicateur fiable du comportement des coûts pour différentes échelles et combinaisons de produits. Les politiques qui favorisent et réglementent les pratiques de monopole par opposition à celles de la concurrence peuvent exiger une meilleure connaissance des conditions des coûts que ne l'ont estimé, dans le passé, les économistes.

3. Survie, contestation et réglementation

On tient généralement pour acquis que les monopoleurs peuvent réaliser des profits économiques et qu'il faut donc imposer une réglementation. Cela laisse supposer qu'il existe des barrières à l'entrée empêchant d'autres concurrents de s'introduire sur le marché et de saper les bases du pouvoir du monopoleur. Au cours des dernières années, on s'est

beaucoup intéressé à la question de l'entrée sur le marché et à ses conséquences sur la réglementation des monopoles, en particulier des monopoles à plusieurs produits. Si l'entrée dans certains marchés ou dans l'ensemble des marchés servis par un monopoleur était relativement facile, la réglementation ne revêtirait peut-être pas autant d'importance. Cette perspective a donné naissance à la théorie des marchés "contestables" (Bailey, 1981; Baumol, 1982; et Baumol, Panzar et Willig, 1982). En présence de marchés contestables, la réglementation n'est peut-être pas nécessaire, même si la structure du marché est de nature monopolistique ou oligopolistique. Par contre, il arrive aussi que l'entrée sur le marché soit possible et rentable, mais non souhaitable d'un point de vue social, de sorte que la réglementation peut être nécessaire pour restreindre l'accès au marché.

Le concept de la contestation se substitue à celui de la concurrence. De façon générale, nous associons intuitivement l'efficacité des marchés concurrentiels au nombre d'entreprises présentes. Lorsque ce nombre est considérable, il est estimé que la concurrence fonctionne bien; les prix correspondent aux coûts marginaux et au coût moyen minimal à long terme. C'est là le modèle orthodoxe des marchés concurrentiels. Cependant, si le nombre d'entreprises est restreint, voire même s'il n'y a qu'une seule entreprise, les structures extrêmement différentes des marchés oligopolistiques ou monopolistiques se manifestent. On s'attend à ce que ces structures différentes correspondent à un modèle autre que celui de la concurrence parfaite.

La théorie des marchés contestables est axée sur les conditions d'entrée et de sortie. Si l'entrée sur le marché et la sortie du marché se réalisent facilement, alors la <u>menace</u> de l'entrée d'une entreprise concurrente produit effectivement le même résultat que la concurrence elle-même. Cela est valable même en présence de coûts décroissants, c'est-à-dire ce que l'on considère généralement comme les conditions du monopole naturel. La menace de l'entrée d'une entreprise concurrente peut suffire à maintenir à un niveau relativement bas les prix de l'entreprise en place. (En effet, paradoxalement, Baumol (1982, p. 14) souligne que l'absence d'entrée sur le marché peut être un signe d'efficacité plutôt que de pouvoir

sur le marché, comme le voudrait la théorie traditionnelle; cela peut signifier que l'entreprise en place maintient ses prix suffisamment bas pour empêcher que l'accès au marché ne soit facile.) Bref, la "main invisible" qui assure l'efficacité des marchés dans le cadre de la concurrence parfaite peut aussi s'appliquer aux cas du monopole et de l'oligopole. Tout dépend des conditions d'entrée et de sortie [16].

La possibilité de contester les marchés est étroitement liée à l'existence de coûts irrécupérables. En fait, ce ne sont pas les rendements croissants en soi qui justifient la réglementation gouvernementale des monopoles naturels; cette nécessité s'impose plutôt lorsque les coûts irrécupérables sont élevés (Bailey, 1981). Le seul autobus ou camion desservant une petite collectivité constitue un monopole naturel si la taille optimale du véhicule est limitée par la taille réduite du marché. L'entrée et la concurrence ne sont toutefois pas inutiles parce que les investissements peuvent être replacés dans d'autres marchés à un coût minimal. L'argument de la contestation justifie l'entrée sur les marchés des lignes aériennes, malgré le coût élevé du matériel. L'aéronef peut toujours être déplacé vers d'autres marchés si l'entreprise ne réussit pas à survivre dans un marché donné (Bailey, 1981). Par contre, si l'entrée sur le marché exige des investissements considérables dans des installations fixes, la concurrence pour un marché limité a alors moins de chance de se concrétiser et peut même être une source de gaspillage. Les investissements irrévocables ou irrécupérables comportent des risques élevés pour une entreprise intéressée à s'introduire sur un marché et l'entreprise déjà en place est en mesure de concurrencer facilement le prix de toute autre entreprise éventuellement intéressée au marché. Les coûts irrécupérables agissent comme une barrière à l'entrée. Ils permettent à l'entreprise en place de demander un prix supérieur et de réaliser des profits de monopole. Par ailleurs, si une autre entreprise décide d'entrer sur le marché, il se produit un gaspillage de ressources en raison du dédoublement des installations. Dans un tel cas, la concurrence n'est pas nécessairement souhaitable.

Une autre conséquence des concepts des marchés contestables et des coûts irrécupérables, c'est qu'ils peuvent influer sur la conception même

des régimes de réglementation (Bailey, 1981). Les coûts irrécupérables peuvent être élevés pour une partie seulement des activités des entreprises ayant une gamme diversifiée de produits. Le fait d'isoler ces parts du marché qui devraient faire l'objet d'une réglementation et d'assurer l'accès aux installations irrécupérables des entreprises éventuellement intéressées permet de s'appuyer sur la concurrence, tout en maintenant un contrôle réglementaire sur le segment industriel en question. Quelques exemples nous viennent immédiatement à l'esprit, notamment les routes et les aéroports, qui comportent des coûts irrécupérables. Le secteur public intervient fortement dans ce domaine, mais si l'on facilite l'accès aux éventuels utilisateurs, on obtient une industrie relativement concurrentielle, même si l'infrastructure est caractérisée par des coûts irrécupérables et décroissants. Le même argument vaut sans doute pour la nationalisation des réseaux de chemins de fer, bien que cette question présente beaucoup plus d'avantages et d'inconvénients que nous ne pouvons étudier ici. Le point fondamental, c'est que les marchés contestables sont ceux pour lesquels les coûts irrécupérables ne sont pas élevés. Dans un tel cas, la concurrence, ou même tout simplement la menace d'une entrée sur le marché, impose des contraintes au monopoliste. Si les coûts irrécupérables sont importants, les marchés ne sont pas aussi facilement contestables et il est alors plus facile de justifier l'intervention gouvernementale. Dans ce genre de cas, on peut concevoir un schème de réglementation qui soit axé sur les secteurs à coûts irrécupérables et permette en même temps un accès concurrentiel à ces secteurs (Bailey, 1981).

Un point intéressant récemment soulevé par rapport à la théorie du monopole naturel à plusieurs produits est lié à la possibilité de survie sur le marché. L'entreprise monopolistique doit être financièrement viable pour pouvoir survivre. Une société monopolistique non réglementée demanderait le prix que les usagers seraient disposés à payer et chercherait à maximiser ses profits, mais elle serait limitée par la possibilité que d'autres aient accès au marché. La facilité d'entrer sur le marché limitera considérablement les éventuels profits économiques. L'autre élément de l'alternative par rapport aux forces du marché et à l'entrée sur le marché est la réglementation. Dans l'un et l'autre cas, il est préférable que l'entreprise monopolistique soit financièrement viable. En d'autres termes,

on exclut la possibilité de prix, correspondant au coût marginal, auxquels viendraient s'ajouter des subventions publiques. L'exclusion de l'équilibre de "premier rang" (prix correspondant au coût marginal avec subvention) est une caractéristique fondamentale de l'analyse fondée sur la survie de l'entreprise ou le caractère "supportable" de sa situation. Il est évident que les entreprises monopolistiques peuvent choisir leurs prix à l'intérieur d'un éventail très vaste. Baumol, Panzar, Willig et d'autres ont axé leurs analyses sur les conditions du marché qui restreignent la liberté de l'entreprise monopolistique en matière de fixation des prix. À l'extrême, ils supposent qu'il n'existe pas de barrières à l'entrée. La question qui se pose alors est la suivante: existe-t-il une série de prix qui permettent aux monopolistes d'atteindre le seuil de rentabilité sans attirer d'autres entreprises vers certaines de leurs gammes de produits ou d'autres sous-marchés? L'entreprise se trouverait alors dans une situation "supportable" [17]. Si une entreprise monopolistique est caractérisée par une fonction de coût sous-additive, c'est-à-dire par des coûts moyens décroissants et des économies de diversification pour toutes les combinaisons de produits, elle se trouve alors dans une situation "supportable" et peut survivre, même s'il existe une assez grande liberté d'accès au marché.

La question qui se pose ensuite consiste à déterminer le meilleur vecteur de prix tant pour l'entreprise monopolistique que pour l'ensemble de la société. On peut établir un prix fondé sur une forme quelconque de prix moyen (bien que les "coûts moyens" soient un concept ambigu dans le cas d'une entreprise ayant plusieurs produits). Les prix dits "Ramsey" sont plus intéressants; il s'agit de la série de prix dont les marges par rapport aux coûts reflètent la volonté de payer de différents acheteurs, de sorte que la viabilité financière est assurée avec des pertes minimes sur le plan du bien-être si l'on considère l'écart par rapport au prix défini en fonction du coût marginal.

4. Prix Ramsey

Au cours des dernières années, on s'est beaucoup intéressé aux prix Ramsey, ainsi nommés en l'honneur de Frank Ramsey qui a été le premier à en décrire les principes en 1927. La question se présente ainsi: quelle est

la façon la plus efficace (perte minimale sur le plan du bien-être) d'obtenir un revenu donné par le biais d'une taxe de vente ou d'autres majorations semblables par rapport aux coûts de production? Récemment, c'est Boiteux (1956, 1971) et surtout Baumol et Bradford (1970) qui ont travaillé à l'élaboration des principes de la fixation de prix supérieurs aux coûts marginaux, destinés à satisfaire à une contrainte de revenu. Les principes s'appliquent à toute contrainte de revenu, mais l'aspect le plus intéressant dans le domaine de l'économique du transport est le financement d'un secteur d'activité à coûts décroissants. En d'autres termes, une entreprise monopolistique à plusieurs produits et à coûts décroissants pourrait imposer des prix qui couvriraient l'ensemble de ses coûts, plutôt que demander une subvention qu'elle jugerait nécessaire si elle fixait ses prix en fonction des coûts marginaux. Les principes de base sont bien connus des économistes qui s'intéressent aux questions de transport. Plutôt que de voir l'entreprise majorer ses prix à partir d'un pourcentage uniforme, la politique optimale consiste à faire varier la marge de bénéfices en fonction de la volonté de payer ou de la "valeur du service". La fixation de prix en fonction de la valeur du service permet de diminuer les pertes en termes de bien-être (demande totale non satisfaite, même si la volonté de payer dépasse le coût marginal). Si les demandes pour divers produits sont indépendantes, les marges seront inversement proportionnelles à l'élasticité de la demande pour le produit. Le prix optimal pour chaque produit (i) est donné par l'équation suivante:

$$\frac{P_i - MC_i}{P_i} = - \frac{B}{e_i}$$

où e_i représente l'élasticité-prix de la demande, où B, égal à zéro, correspond à des prix de "premier rang", c'est-à-dire à une situation parfaitement concurrentielle, et où B, égal à l'unité, correspond au cas du monopole sans restriction, c'est-à-dire qu'il y a maximisation des profits. En fait, B se situe entre zéro et un, selon le revenu à engendrer.

La formule Ramsey de fixation des prix est beaucoup plus complexe lorsque les élasticités croisées de la demande ne sont pas nulles, comme

nous le présumons dans l'équation précédente. Pour calculer les marges de prix optimales, il faut intégrer la matrice des élasticités simples et des élasticités croisées.

En fait, il existe une règle relativement simple pour obtenir les prix optimaux dans les cas d'élasticités simples et les cas plus complexes d'élasticités croisées. L'"écard optimal par rapport au prix correspondant au coût marginal" ou le "prix quasi optimal" (Baumol et Bradford, 1970) correspond à une réduction équiproportionnelle de la production par rapport à celle qui correspond à P = MC. Si l'on tient compte des élasticités croisées, les demandes les plus élastiques entraînent des marges plus faibles. D'un point de vue conceptuel, cette règle paraît très simple, mais elle ne serait pas aussi simple à mettre en pratique (nous reviendrons sur ce sujet plus loin).

La fixation des prix en fonction de la formule Ramsey est particulièrement intéressante à l'égard du système de transport au Canada. En effet, comme les sociétés ferroviaires doivent couvrir leurs frais généraux et d'autres éléments de coûts décroissants (notamment les pertes non compensées), et que nous voulons que ces sociétés s'autofinancent, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de subventions publiques, alors la politique optimale du point de vue économique consiste à leur permettre de fixer des prix en fonction de la valeur du service jusqu'au niveau où elles dépassent le taux de rendement concurrentiel. Il s'agit là d'une justification économique de la liberté dont jouissent les sociétés ferroviaires canadiennes dans la fixation de leurs prix.

Il faut souligner deux questions que cela soulève. Premièrement, l'argument militant en faveur de la fixation des prix en fonction de la valeur du service vaut jusqu'à ce que le taux de rendement des sociétés ferroviaires atteigne les niveaux concurrentiels, c'est-à-dire, jusqu'à ce que l'objectif financier soit atteint. Si les sociétés ferroviaires réalisent des profits économiques, il faut alors introduire la réglementation pour les raisons habituelles relatives à l'existence de monopoles. Soulignons que si les gains des sociétés deviennent effectivement excessifs, la politique de réglementation optimale ne consiste pas à réduire

les taux de façon uniforme. La politique de taxation optimale (prix Ramsey) suppose des réductions différenciées qui traduisent les élasticités différentes des diverses demandes pour le transport. La règle optimale en matière de diminution des profits des sociétés ferroviaires consisterait à exiger que les taux soient réduits de façon qu'il y ait une augmentation équiproportionnelle de tous les modes de transport par rapport aux niveaux qui existeraient en l'absence de réduction des prix. Comme nous l'avons déjà fait remarqué, cette règle, très simple en principe, serait difficile à appliquer en pratique.

Le second aspect à souligner, relativement aux prix Ramsey et à leur application aux sociétés ferroviaires canadiennes, est que l'argumentation jusqu'ici élaborée vaut pour un seul secteur de l'économie, à savoir celui des sociétés ferroviaires, tandis que les principes de Ramsey peuvent s'appliquer à plus d'un secteur, ce qui permet de réaliser des gains d'efficacité. Nous reviendrons sur cet aspect dans la section D.6.

5. Prix Ramsey et survie des entreprises

Baumol, Bailey et Willig (1977) démontrent le théorème dit de "main invisible faible" selon lequel, en l'absence de barrières à l'entrée, les monopoles naturels à plusieurs produits sont tenus en laisse par la menace de l'entrée d'autres entreprises. En fait, les prix Ramsey sont supportables en présence de profits économiques nuls pour l'entreprise caractérisée par une fonction de coût sous-additive. La main invisible ne s'applique donc pas seulement aux marchés concurrentiels. L'intervention gouvernementale n'est peut-être pas nécessaire, même dans le cas de monopoles naturels, pourvu que les marchés soient contestables (entrée libre).

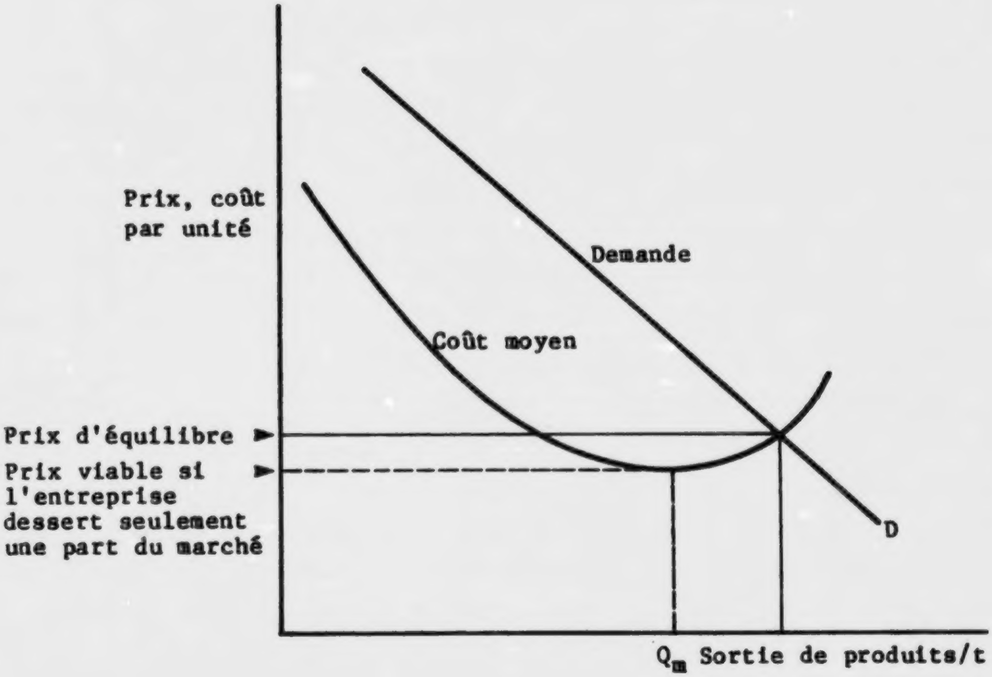
Deux conditions sont déterminantes. La première est la liberté d'accès aux marchés qui agit comme facteur de concurrence sur le comportement des entreprises monopolistiques en matière de prix. Deuxièmement, les conditions relatives aux coûts doivent être telles que le monopole soit supportable. Ces deux aspects méritent d'être précisés; nous aborderons d'abord le second.

Si la fonction de coût est caractérisée par des éléments de coûts croissants et (ou) une concavité trans-rayon (certaines combinaisons de produits coûtent davantage précisément lorsqu'elles sont produites en combinaison, comparativement à une production distincte), il est alors possible qu'en situation d'entrée libre, d'autres entreprises puissent servir des sous-marchés de façon rentable, et ce, à des prix inférieurs à ceux de l'entreprise monopolistique. Cela pourrait nuire à la survie de l'entreprise monopolistique. Il s'agit là d'un phénomène caractérisant essentiellement les entreprises ayant plusieurs produits, mais nous pouvons présenter deux exemples simples de ce genre de cas. Le premier, tiré de l'ouvrage de Panar et Willig (1977), est exposé à la figure 7. Si les coûts sont croissants pour un éventail de produits donnés, un sous-groupe de consommateurs pourrait alors se détacher des autres et être approvisionné de façon rentable à un prix inférieur à celui qu'impose la société monopolistique, même si celle-ci ne fait que couvrir ses coûts, comme on l'observe à la figure 7. Pourtant, la société monopolistique réglementée est obligée de desservir l'ensemble du trafic au prix défini par le seuil de rentabilité. Une nouvelle société qui voudrait s'introduire sur un marché ne chercherait à servir qu'une petite part du marché, à savoir celle qui peut être desservie au coût moyen minimum, le trafic à coût plus élevé étant laissé à la société déjà en place. En l'occurrence, l'entreprise initiale n'est plus viable. Cela nous rappelle l'ancien argument de l'"écrémage" dans l'industrie du transport et l'on voit bien la logique de l'argument. Les hypothèses fondamentales sont celles voulant qu'une seule entreprise puisse être viable et que, à la marge, les coûts s'accroissent [18].

La figure 8 fournit un autre exemple de ce problème de survie. N'oublions pas que la survie du monopole naturel à plusieurs produits exige que les revenus totaux soient couverts, de sorte que les prix seront nécessairement supérieurs au coût marginal et, si l'on fait appel aux prix Ramsey, les marges varieront en fonction de la volonté de payer. Si la fonction de coût n'est pas strictement sous-additive, ou presque, certains segments du marché peuvent être envahis par de nouveaux fournisseurs, même si ces derniers ont des coûts de production supérieurs à ceux du monopole. La figure 8 montre que les monopoles demandent un prix légèrement supérieur au coût marginal ("MC" pour nous rappeler qu'il s'agit du coût marginal

Figure 7

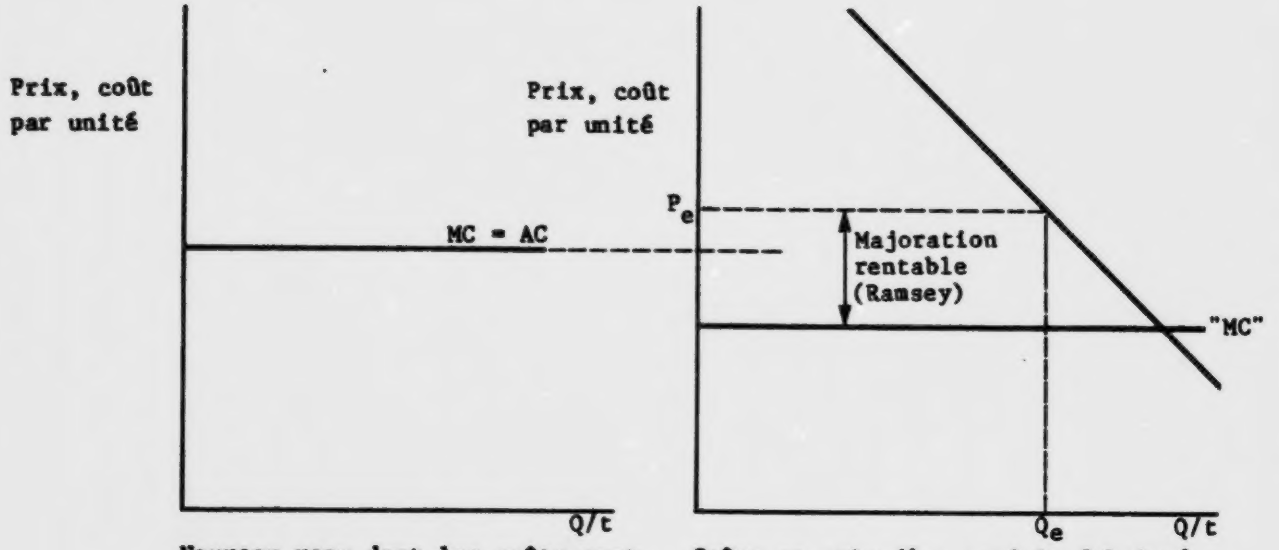
PROBLÈME DE VIABILITÉ LORSQUE L'ENTRÉE EST LIBRE



Source: Panzar et Willig (1977)

Figure 8

ILLUSTRATION D'UN CONTRÔLE À L'ENTRÉE POUR ASSURER
LA VIABILITÉ D'UN MONOPOLE RÉGLEMENTÉ



Nouveau venu dont les coûts sont inférieurs au prix du monopole réglementé

Coûts et prix d'un produit fabriqué par un monopole à produit multiples réglementé

d'une entreprise à plusieurs produits; "MC" est déterminé en tenant compte de l'ensemble des activités de l'entreprise). L'écart entre les coûts et les prix est nécessaire pour assurer la viabilité financière. La figure 8 montre que la nouvelle entreprise serait rentable si elle imposait les prix de monopole, mais ses coûts sont supérieurs. Cette nouvelle entreprise n'apporte rien de plus à l'ensemble de la société; elle menace simplement de nuire à la viabilité du monopole. Il peut donc être préférable que la réglementation interdise la présence d'une société concurrente qui offrirait un prix inférieur à celui que demande la société monopolistique [19].

Nous voyons donc qu'il peut exister des situations où le libre accès au marché n'est pas souhaitable, étant donné les aspects relatifs aux coûts décroissants dans les sociétés existantes. Les hypothèses sous-jacentes fondamentales sont les suivantes: (1) les entreprises dont les coûts sont décroissants doivent être financièrement viables, et (2) il doit exister un régime efficace de réglementation. L'hypothèse veut que la réglementation permette d'atteindre des prix (Ramsey) qui soient efficaces et produisent des revenus suffisants pour que l'entreprise à coûts décroissants soit viable [20]. Les prix Ramsey permettent de financer le monopole naturel à plusieurs produits si la fonction de coût est strictement sous-additive. Il n'y a aucune raison de penser que les fonctions de coût sont strictement sous-additives, c'est-à-dire qu'il est probable que certaines activités de l'entreprise comportent des éléments de coûts croissants. C'est certainement le cas pour les sociétés ferroviaires. Par conséquent, l'entrée sur les marchés ferroviaires peut nuire à la fixation de prix Ramsey efficaces. En fait, nous verrons que l'existence d'une concurrence entre les divers modes de transport soulève de sérieuses questions au sujet des avantages des prix Ramsey et de la possibilité de les adopter.

6. Prix Ramsey et concurrence intermodale

Deux question se posent ici: la première a trait au principe de l'optimum de "second rang", selon lequel le fait de demander un prix supérieur au coût marginal dans un mode donné de transport entraîne une variation de prix dans d'autres modes, ce qui assure une répartition

efficace des ressources entre les divers secteurs de l'économie. La seconde question a trait au fait que les contraintes de revenu (et la nécessité de prix Ramsey) devraient s'appliquer à l'ensemble des modes de transport (ou des secteurs de l'économie), c'est-à-dire que la taxation optimale devrait s'appliquer à l'ensemble des modes de transport et non à un seul mode.

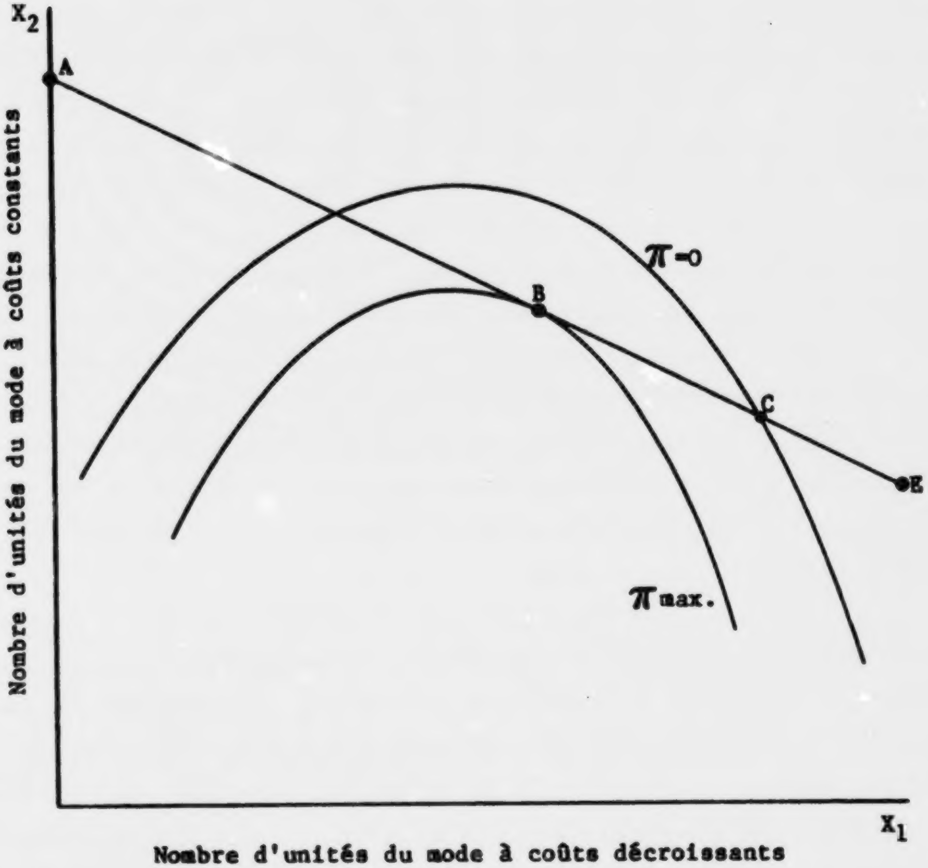
Braeutigam (1979) illustre le premier point relatif à la fixation des prix optimaux et à la concurrence intermodale. Il présente une analyse mathématique formelle, mais, pour ma part, je m'en tiendrai à une illustration géométrique simple. Supposons qu'il existe un mode de transport, par exemple le transport routier, qui produise les quantités X2 à un coût constant. X1 représente la production d'un mode de transport dont les coûts sont décroissants, à savoir les chemins de fer. Le service offert par ces modes de transport est différent, de sorte qu'il existe aussi une gamme de prix et de parts de marché différentes. Dans la figure 9, le lieu géométrique des points AE représente les quantités de X1 et X2 correspondant aux divers prix de X1 et au prix d'équilibre pour X2 [21]. Le point E représente l'optimum du prix correspondant au coût marginal pour X1, mais ce prix exigerait la présence d'une subvention. Si l'on oblige le mode 1 à s'autofinancer, le prix "quasi optimal" sera alors supérieur au coût marginal. La quantité de X1 offerte diminuera et celle de X2 augmentera. Il faut pousser davantage l'analyse pour expliquer ce déplacement et pour proposer une option plus efficace.

Si l'on considère X1, on peut obtenir un niveau donné de profits à partir de prix différents (et de quantités différentes) pour X1 et X2, bien que seules les quantités données par le lieu géométrique défini par AE correspondent à des prix d'équilibre. Deux courbes d'iso-profit représentant les profits paraissent à la figure 9. Le point de maximisation du profit est le point B. (Les intersections des courbes d'iso-profit à la gauche de B ne sont d'aucun intérêt.) La contrainte du seuil de rentabilité (profit nul) pour X1 correspond au point C. Braeutigam (1979) qualifie cette situation d'"optimum de second rang partiellement réglementé"; le prix du mode de transport à coût décroissant peut augmenter pour que l'entreprise puisse s'autofinancer et le mode de transport à coût constant, X2, peut offrir tout ce qu'il veut au prix adopté par X1.

Figure 9

LIEU DES QUANTITÉS D'ÉQUILIBRES DE X_1 (MODE DE TRANSPORT À COÛTS DÉCROISSANTS) ET X_2 (MODE DE TRANSPORT À COÛTS CONSTANTS) CORRESPONDANT À DIFFÉRENTS PRIX DE X_1

Courbes d'iso-profits pour X_1



Source: Braeutigam (1979)

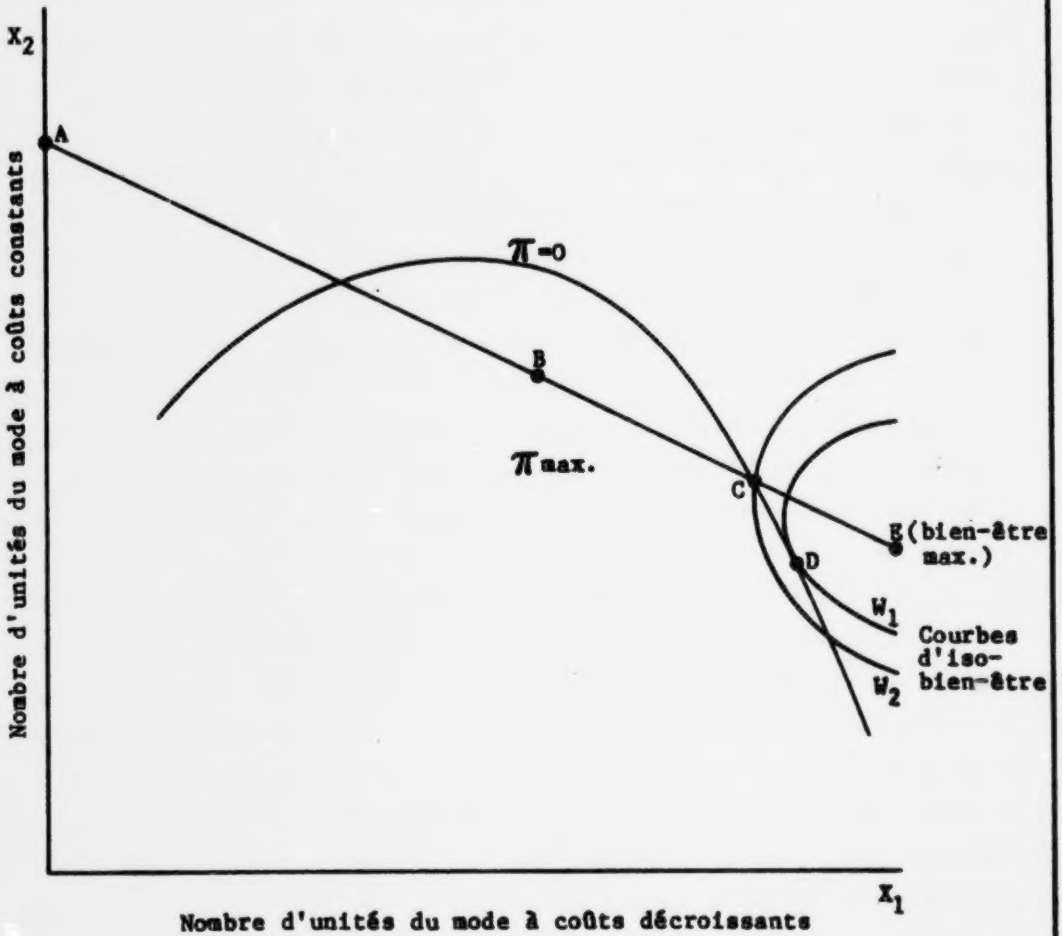
Il existe toutefois une solution plus efficace. Selon la théorie de l'"optimum de second rang", une fois qu'une contrainte nous a amenés à nous déplacer du prix correspondant au coût marginal dans un secteur de l'économie, il est optimal que les prix dépassent le coût marginal dans un secteur substitut. Cela peut s'illustrer de la façon suivante. On peut imaginer une fonction de bien-être (somme des surplus des producteurs et des consommateurs) en haut de X1 et X2. Il s'agit d'une courbe dont le sommet se situe en haut du point E. Nous pouvons projeter des courbes d'iso-bien-être sur le diagramme X1-X2. C'est ce que montre la figure 10. Les courbes d'iso-bien-être sont verticales lorsqu'elles croisent le point AE. En effet, le prix d'équilibre de X2 correspond au prix (et à la quantité) le plus efficace, étant donné le prix de X1 (pour la preuve mathématique, voir Braeutigam, 1979). Le maximum de bien-être sous contrainte est représenté par le point de tangence entre la courbe de profit nul pour X1 (contrainte d'équilibre) et la courbe d'iso-bien-être. Il s'agit du point D à la figure 10. La quantité de X2 est inférieure à la quantité en AE, de sorte que X2 a un prix plus élevé. Comme il ne s'agit pas du prix d'équilibre de X2, ce prix ne peut être soutenu sans une intervention gouvernementale. Cela peut se faire en imposant certaines restrictions à l'entrée de façon à augmenter les prix pour un mode de transport donné, ou encore en prélevant une taxe sur X2. Le point D correspond à ce que Braeutigam appelle l'"optimum de second rang totalement réglementé".

L'analyse précédente montre que les principes de fixation des prix en fonction de l'optimum de second rang exigent une intervention sur les marchés concurrentiels si l'on veut réaliser la meilleure répartition possible des ressources, compte tenu de la contrainte voulant que le secteur à coûts décroissants s'autofinance. La question qui consiste à déterminer si les gains en bien-être résultant du passage de C à D compensent les coûts d'administration qui en découlent est de nature empirique, question extrêmement importante à laquelle la théorie n'apporte pas de réponse.

J'aimerais maintenant poursuivre l'analyse de l'optimum et de la concurrence intermodale. De façon générale, on considère que les transporteurs routiers font face à des coûts constants. C'est effectivement le cas, y compris du point de vue des transporteurs eux-mêmes. Cela vient

Figure 10

PRIX DE SECOND RANG DU MODE DE TRANSPORT
À COÛTS DÉCROISSANTS LIMITÉS À L'ÉQUILIBRE



Nombre d'unités du mode à coûts décroissants

Source: Braeutigam (1979)

du fait que les coûts liés à l'infrastructure sont supportés par l'ensemble du public et que des frais variables sont imposés pour l'utilisation des routes. La congestion ne constitue généralement pas un problème dans le cas du transport inter-urbain, où l'on observe un volume important de capacité sous-utilisée. Bref, l'infrastructure routière est un secteur à coûts décroissants, mais nous imposons des prix d'utilisation qui sont supérieurs au coût marginal. Le principe de la taxation employé pour le financement routier est différent de celui de la taxation implicite (majoration du prix en fonction de la valeur du service) appliqué aux chemins de fer. Les frais imposés aux usagers peuvent varier en fonction de la taille du véhicule routier, mais non pas en fonction de ce que le véhicule renferme. Les transporteurs routiers peuvent appliquer une certaine forme de prix définis en fonction de la valeur du service, surtout s'ils font l'objet d'une réglementation restreignant l'entrée sur le marché, mais nous nous entendons tous sur le fait que les possibilités d'imposer des prix Ramsey fixés en fonction de la valeur du service sont plus restreintes dans le domaine du camionnage que dans celui des chemins de fer. Bref, les principes de taxation implicite permettant de couvrir les coûts d'infrastructure dans les transports routiers et les chemins de fer sont différents. Si l'on pouvait appliquer une politique cohérente de taxation et de prix à l'ensemble des modes de transport, on pourrait sans doute réaliser des gains sur le plan du bien-être.

Un des deux principes de Boiteux (1956, 1971) est que le cadre optimal de taxation devrait être appliqué le plus largement possible. En d'autres termes, plutôt que de fixer des taxes (majorations de prix) pour un secteur donné de l'économie, les principes relatifs aux taxes et les exigences sur le plan du revenu devraient être coordonnés entre les divers secteurs de l'économie. Le fait que les sociétés ferroviaires fixent leurs prix en fonction de la valeur du service offert leur permet de satisfaire à la contrainte de la viabilité financière, malgré l'existence d'activités à coûts décroissants et la possibilité que certaines obligations publiques ne soient pas rentables. Si l'on groupe d'autres modes de transport et si l'on considère le total des revenus nécessaires pour l'ensemble des modes et qu'on établit une politique optimale de taxation pour obtenir ces revenus, les taxes ou majorations de prix seront sans doute différentes de celles qui

résulteraient de la fixation par les sociétés ferroviaires de prix définis uniquement en fonction de la valeur du service. Une politique de taxation optimale comporterait des marges différentes établies en fonction de la volonté de payer pour le transport, quel que soit le mode utilisé. En présence d'une concurrence intermodale, cependant, le marché empêche le système de fixation des prix ferroviaires en fonction de la valeur du service d'exploiter la volonté de payer des usagers. La concurrence intermodale nuit à la viabilité des prix Ramsey appliqués à plusieurs modes de transport. Les marges sont inférieures au niveau optimal lorsqu'il y a concurrence entre les divers modes de transport et, comme la contrainte de revenu des sociétés ferroviaires demeure la même, les marges sont supérieures au niveau optimal en l'absence de concurrence. Cependant, pour mettre en oeuvre une politique optimale de taxation et de prix qui vaudrait pour l'ensemble des modes de transport, il faudrait établir une réglementation très vaste. La responsabilité de la fixation des prix relèverait de l'organisme de réglementation (ou encore il faudrait établir un monopole public de l'ensemble des modes de transport ce qui, dans le cas présent, revient au même).

Où nous conduit cet exercice théorique? Il nous mène à l'argument selon lequel il faut que le gouvernement intervienne fortement pour réaliser une répartition optimale des ressources en matière de transport, ainsi qu'au fait que toutes les composantes à coûts décroissants (et tout autre besoin de revenu supérieur au coût marginal) doivent être financées par les usagers du transport, et non par des subventions publiques. On présume que l'objectif de la réglementation est l'efficacité économique, compte tenu des contraintes de revenu, et l'on suppose qu'il est possible d'établir une réglementation gouvernementale efficace, peu coûteuse, et tout à fait justifiée dans tous les cas. Il est toutefois peut-être permis d'en douter...

Taplin et Waters (1981) ont fait certains calculs relativement à l'incidence d'un cadre optimal de prix Ramsey-Boiteux pour l'Australie. L'analyse était limitée au fret transporté par route et par rail. Les marchandises ont été groupées en quatre grandes catégories. Les fonctions de coût pour le transport par route et par rail ont été établies à partir

d'estimations de l'élasticité-prix simple et croisée de la demande. Les prix quasi optimaux ont ensuite été estimés afin d'obtenir le surplus de revenu gouvernemental que dégagent actuellement ces modes de transport (les chemins de fer couvrent nettement leurs coûts pour le transport du fret, mais enregistrent des pertes considérables pour ce qui est du trafic-passager). Les taxes ou majorations de prix qui en résultent entraînent un déplacement important du trafic routier vers les chemins de fer et un déplacement considérable du fardeau de la taxation du trafic ferroviaire non concurrentiel vers le trafic concurrentiel [22].

E. Conclusion

Les principes économiques que nous avons analysés nous conduisent à une augmentation, plutôt qu'à une diminution, de l'intervention gouvernementale dans les marchés des transports. Soulignons toutefois qu'il s'agit là d'un exercice théorique. La théorie semble mener soit vers le monopole dans tous les modes de transport et une réglementation très détaillée, soit, ce qui revient au même dans le présent cas, à un monopole gouvernemental du transport. L'utilité de la théorie dépend de la faisabilité et du coût de l'établissement d'un système de prix plus efficace grâce à l'intervention gouvernementale, comparativement aux avantages associés à l'amélioration de la répartition des ressources. Nombre d'économistes s'interrogent toujours au sujet de l'efficacité économique de la réglementation et, partant, peuvent mettre en doute l'à-propos de l'analyse précédente (Shepherd, 1981). Les principes n'en demeurent pas moins. Étant donné la contrainte voulant que le secteur du transport s'autofinance malgré l'existence de certains coûts décroissants, on peut justifier l'intervention gouvernementale parce qu'elle peut aider à établir une structure de prix optimale dans les cas où la concurrence entraînerait des distorsions.

L'étape logique suivante consiste à se demander pourquoi on isole le secteur du transport. Une politique plus globale et plus efficace consisterait à appliquer les principes de la taxation optimale à un plus grand nombre de secteurs. Cela nous mène vers un régime socialiste du type Lange-Lerner. En théorie, un gouvernement parfait pourrait améliorer le

système économique en tenant compte des complexités et des contraintes du marché que nous venons de mentionner. Mais faudrait-il suivre ce raisonnement dans la pratique? Tout comme les marchés réels diffèrent considérablement des marchés parfaits définis par la théorie orthodoxe, le gouvernement réel diffère des idéaux des manuels scolaires. Le travail d'information est astronomique et pratiquement impossible à réaliser. La théorie suppose qu'une autorité centrale peut connaître les conditions de coût et de demande aussi bien ou même mieux que les entreprises individuelles qui interviennent sur les marchés. Comme toute analyse statique comparative dans le domaine de l'économie du bien-être, cela ne tient pas compte des effets dynamiques éventuels de la concurrence sur les marchés, et notamment de l'incitation à innover. Il s'agit là de propositions douteuses, et il faut considérer avec une certaine réserve les divers arguments exposés ici. En théorie, la volonté de faire payer les secteurs à coûts décroissants <u>et</u> la préférence pour les majorations de prix optimales nous mènent logiquement vers une plus forte intervention gouvernementale sur le plan des prix et de l'entrée sur les marchés du transport, comme ce serait d'ailleurs le cas pour tout autre marché. Mais, nous l'avons mentionné, ce scénario est fondé sur l'hypothèse d'un gouvernement omniscient et non coûteux qui doit intervenir pour imposer la structure optimale de taxation. Tout cela est extrêmement éloigné du besoin beaucoup plus pressant de conseils concrets de nature économique, qui permettraient de déterminer si une politique de réglementation (ou de promotion) conduirait à une amélioration ou à une détérioration de la performance du secteur des transports ou de l'ensemble de l'économie, ce que la théorie ne nous dit pas. Ma conviction personnelle m'amène à me fier davantage aux marchés, mais les développements récents de la théorie économique relative à la réglementation ne nous permettent pas de dégager des conclusions plus définitives.

La présente analyse est de toute évidence incomplète et très partielle. Je crois cependant que la pensée économique évolue de façon très intéressante et que certains aspects pourraient être déterminants dans la conception et l'application d'une réglementation en matière de transport. Il reste à déterminer dans quelle mesure ces idées seraient pertinentes ou importantes. Il est étonnant de constater que certaines recherches

économiques commencent à permettre de reconnaître des situations où la réglementation gouvernementale peut être souhaitable. Cela contraste nettement avec la plupart des analyses économiques de la réglementation qui concluent que la performance économique des institutions de réglementation n'a pas été très positive. Cependant, comme un de mes collègues l'a mentionné lorsque j'ai soulevé un de ces points, les critiques économiques de la réglementation démontrent que la réglementation élaborée au début du 20e siècle ou durant la dépression n'est plus efficace à la fin de ce siècle. Cela ne signifie pas que la réglementation ne peut jouer aucun rôle en cette fin du 20e siècle et qu'elle ne puisse pas être préférable à l'absence totale de réglementation. Il reste à déterminer si les progrès récents nous conduiront vers l'objectif recherché, mais l'exploration de ces avenues est certes justifiée.

RENVOIS

[1] Roy (1980) et Caves et Christensen (1978). La fonction translogarithmique a été introduite pour la première fois en 1973 par Christensen, Jorgensen et Lau. Diverses applications de cette fonction à l'industrie des transports ont été avancées, surtout par des chercheurs de l'Université du Wisconsin et du M.I.T. Voir Waters et Woodland (1982) pour un résumé de cette application au secteur des chemins de fer.

[2] Il est ironique de constater que certaines des études coûts-avantages sociaux les plus poussées ont été faites dans des pays qu'on appelle "du tiers monde" plutôt que dans des pays industrialisés. Ce phénomène reflète l'utilisation intense que font la Banque mondiale et les Nations unies de ces études et l'importance qui leur est accordée. Des manuels détaillés sur l'évaluation des projets ont été préparés. Voir Conseil du trésor (1976) pour un bref résumé des principes de coûts-avantages sociaux dans le contexte canadien.

[3] Les références sont trop nombreuses pour être citées. Je dois au moins mentionner Walters (1961), Johnson (1964) et le "rapport Smeed" (1964). Les recherches se poursuivent dans ce domaine.

[4] Des références importantes sur les stratégies en l'absence de prix socialement optimaux pourraient être trouvées dans les ouvrages de Wheaton (1978) et de Friedlaender (1981). Les principales conséquences d'une fixation non optimale des prix sur les décisions d'investissement sont reconnues en Angleterre depuis plusieurs années; pour une brève étude, voir, par exemple, Gwilliam et Mackie (1975), p. 209-210.

[5] Voir dans Lipsey et Lancaster (1956-1957) la formulation originale de la théorie sur l'optimum de second rang. Nombre de publications ont fait suite à cet apport. Voir Turvey (1971) pour une structure pragmatique qui permettrait d'estimer les prix de second rang.

[6] De nouveau, les références sont trop nombreuses pour être étudiées. En plus de la formulation originale effectuée par Averch et Johnson (1962), voir Bailey (1973), Baumol et Klevorick (1970) ainsi que Zajac (1970).

[7] Les auteurs dans ce domaine sont nombreux. Meyer et al. (1959) pourraient sans doute être cités en premier, mais bien d'autres auteurs ont auparavant précisé les désavantages économiques de la réglementation. En ce qui concerne les efforts déployés pour attribuer une valeur monétaire aux coûts que provoque une réglementation inefficace, voir Moore (1972) ainsi que Friedlaender (1969 et 1971), Boyer (1977) et Winston (1981).

[8] Cette hypothèse est importante. Il est bien connu que, en présence d'une différenciation, la concurrence peut amener une distinction négligeable des produits. Supposons que les voyageurs qui prennent l'avion souhaitent partir entre 7 et 9 heures du matin et que les départs désirés soient répartis uniformément entre ces heures. Deux sociétés aériennes qui se font concurrence tenteraient l'une et l'autre de fixer le départ à 8 heures alors que, pour les voyageurs, l'horaire le plus commode serait 7 h 30 et 8 h 30. Cette absence de "rivalité locale" est une importante hypothèse de l'analyse.

[9] Comme nous le verrons dans la première partie du prochain paragraphe, les usagers peuvent profiter des rendements croissants si le service est plus fréquent, surtout sur les routes moins fréquentées. Mais ces rendements croissants prennent la forme d'un effet externe. Comme les marchés concurrentiels n'introduisent pas les effets externes, ils sont susceptibles de fournir un service insuffisant sur les routes peu fréquentées.

[10] Pour une étude complète du concept du monopole naturel et de sa réglementation, voir Posner (1969).

[11] Ce paragraphe s'inspire en très grande partie de Waters (1982).

[12] Ce point est désigné par "retard dû à la fréquence" dans la documentation sur la fixation des prix et l'économie des transports aériens; voir, par exemple, Douglas et Miller (1974a). Il existe aussi des retards dus à la foule ou "retards stochastiques" (ibid.) lorsque les véhicules sont remplis et que les passagers ou les affréteurs doivent attendre le départ suivant. Voir Jansson (1979) pour une étude complète des types de coûts, en matière de temps, que doivent supporter les usagers.

[13] Il est possible qu'une entreprise d'autobus soit en mesure de mettre en service avec la même fréquence des autobus deux fois plus gros. Les économies réalisées sur la taille des véhicules constituent une source de rendements croissants pour l'entreprise. Ces épargnes potentielles doivent être comparées à la valeur du temps épargné grâce à une fréquence plus élevée pour déterminer quelle est la politique socialement optimale.

[14] Dans le cas particulier où l'entreprise d'autobus augmente le nombre d'autobus proportionnellement à l'accroissement de la demande (c'est-à-dire qu'un doublement de la demande exigerait un doublement de l'offre d'autobus), le temps de l'attente total est constant et les coûts de temps marginaux sont nuls. La courbe de coût marginal social s'y rapportant est simplement MC_B ($= AC_B$) et nécessite même une subvention plus importante que ne l'indique la figure 3. Malheureusement, ce point n'est pas inclus dans ma prochaine analyse (1982).

[15] Voir Turvey et Mohring (1975) pour une étude concise de ces divers concepts de coûts et de leurs applications à une fixation optimale des prix. Voir aussi Jansson (1979).

[16] Nombre d'auteurs ont reconnu depuis longtemps l'importance de la <u>menace</u> de l'entrée en tant que force concurrentiuelle efficace. Néanmoins, l'analyse théorique formelle n'a accordé qu'une attention limitée à cette question.

[17] La viabilité est une question reprise dans nombre de référence citées dans la présente étude. Voir, en particulier, Panzar et Willig (1977) ainsi que Zajac (1978), chapitre 7.

[18] Une des critiques adressées à l'analyse de la viabilité (notamment Shepherd, 1981) porte sur le fait qu'elle ne permet pas à l'entreprise en place de réagir au prix opposé par l'entreprise nouvelle (sans doute en raison de règlements restrictifs). Cette critique pourrait toutefois être sans importance. Il reste qu'un sous-ensemble du marché pourrait attirer de nouvelles entrées à un prix inférieur au prix qui devrait assurer la viabilité financière de l'industrie dans son ensemble.

[19] Voir aussi Faulhaber (1975) sur le schéma des études de Ramsey sur la fixation des prix, par opposition à la situation où les prix sont limités par une entrée concurrentielle.

[20] Voir Shepherd (1981) pour une critique de la pertinence des arguments de la viabilité en faveur de la présente politique de réglementation.

[21] Une restriction de la représentation géométrique porte sur le fait que l'existence de structures de prix dits "Ramsey" pour un mode de transport donné n'est pas évidente. Si l'entreprise qui produit le mode à coûts décroissants ne fabriquait qu'un seul produit, le prix d'équilibre devrait être égal au coût moyen. Un lieu géométrique comme AE pourrait être défini pour l'entreprise à produits multiples dont les prix ne s'ajustent pas aux prix établis d'après le modèle de Ramsey, c'est-à-dire l'équivalent, pour une entreprise à produits multiples, de la fixation du prix au coût moyen. Dans ce cas, le lieu des quantités d'équilibre du marché, AE, ne serait pas socialement optimal.

[22] Pour ce qui a trait à la géométrie de Brauetigam, l'application de la contrainte de revenu aux deux modes de transport "à la façon" de Boiteux signifie que les droits fiscaux perçus à partir des modes de transport à coûts constants devraient réduire les besoins en revenu du secteur à coûts décroissants. Les prix de second rang entièrement réglementés se situeraient donc aux points de tangence d'une courbe d'iso-bien-être au lieu correspondant des profits, où ceux-ci, négatifs certes, n'étaient pas aussi bas que si les prix avaient été simplement fixés au coût marginal. L'optimum devrait se situer à droite du point D sur la figure 10.

BIBLIOGRAPHIE

AVERCH, H., et L.L. JOHNSON. "Behavior of the Firm Under a Regulatory Constraint", dans American Economic Review (déc. 1962), p. 1053-1069.

BAILEY, Elizabeth E. Economic Theory of Regulatory Constraint, Heath-Lexington, 1973.

BAILEY, Elizabeth E. "Contestability and the Design of Regulatory and and Antitrust Policy", dans American Economic Review (mai 1981), p. 179-183.

BAUMOL, W.J. "Contestable Markets: An Uprising in the Theory of Industry Structure", dans American Economic Review (mars 1982), p. 1-15.

BAUMOL, W.J. "On the Proper Cost Texts for Natural Monopoly in a Multiproduct Industry", dans American Economic Review (déc. 1977), p. 809-822.

BAUMOL, W.J., E.E. BAILEY, et R.D. WILLIG. "Weak Invisible Hand Theorems on the Sustainability of Natural Monopoly", dans American Economic Review (juin 1977), p. 350-365.

BAUMOL, W.J., et D.F. BRADFORD. "Optimal Departures from Marginal Cost Pricing", dans American Economic Review (juin 1970), p. 265-283.

BAUMOL, W.J., et A.K. KLEVORICK. "Input Choices and Rate-of-Return Regulation: An Overview of the Discussion", dans Bell Journal of Economics and Management Science (automne 1970), p. 162-190.

BAUMOL, W.J., J.C. PANZAR, et R.D. WILLIG. Contestable Markets and the Theory of Industry Structure, San Diego, Harcourt Brace Jovanovich, 1982.

BOITEUX, M. "Sur la gestion des monopoles publics astreints à l'équilibre budgétaire", dans Econometrica (janv. 1956).

BORINS, Sanford F. "Pricing and Investment in a Transportation Network: The Case of Toronto Airport", dans The Canadian Journal of Economics (nov. 1978), p. 680-700.

BOYER, K.D. "Minimum Rate Regulation, Modal Split Sensitivities, and the Railroad Problem", dans Journal of Political Economy (juin 1977), p. 493-512.

BRAEUTIGAM, R.R. "Optimal Pricing with Intermodal Competition", dans American Economic Review (mars 1979), p. 38-49.

CARLIN, A., et R.E. PARK. "Marginal Cost Pricing of Airport Runway Capacity", dans American Economic Review (juin 1970), p. 310-319.

CAVES, D.W., et L.R. CHRISTENSEN. La productivité des chemins de fer canadiens, 1956-1975, rapport de recherche n° 78-16F, Commission canadienne des transports, 1978.

CAVES, L.R., D.W. JORGENSON, et L.F. LAU. "Transcendental Logarithmic Production Frontiers", dans Review of Economics and Statistics (fév. 1973), p. 28-45.

DEVANY, A.S. "The Effect of Price and Entry Regulation on Airline Output, Output, Capacity and Efficiency", dans Bell Journal of Economics (printemps 1975), p. 327-345.

DOUGLAS, G.W., et J.C. MILLER III. Economic Regulation of Domestic Air Transport: Theory and Policy, Washington, D.C., The Brookings Institute, 1974a.

DOUGLAS, G.W., et J.C. MILLER III. "Quality Competition, Industry Equilibrium and Efficiency in the Price Constrained Airline Market", dans American Economic Review (sept. 1974b), p. 657-669.

FAULHABER, G.R. "Cross-Subsidization: Pricing in Public Enterprise", dans American Economic Review (déc. 1975).

FRIEDLAENDER, A.F. "Price Distortions and Second Best Investment Rules in the Transportation Industries", dans American Economic Review (mai 1981), p. 389-393.

FREIDLAENDER, A.F. The Dilemma of Freight Transport Regulation, Washington, D.C., Brookings Institution, 1969.

FRIEDLAENDER, A.F. "The Social Cost of Railroad Regulation", dans American Economic Review (mai 1971).

GWILLIAM, K.M., et P.J. MACKIE. Economics and Transport Policy, Londres, George Allen and Unwin Ltd., 1975.

JANSSON, J.O. "Marginal Cost Pricing of Scheduled Transport Services", dans Journal of Transport Economics and Policy (sept. 1979), p. 268-294.

JOHNSON, M. Bruce. "On the Economics of Road Congestion", dans Econometrica (janv.-avril 1964).

JORDAN, William A. Airline Regulation in America: Effects and Imperfections, John Hopkins Press, 1970.

LEVIN, Richard C. "Railroad Rates, Profitability Welfare Under Deregulation", dans Bell Journal of Economics (printemps 1981).

LEVIN, Richard C. "Railroad Regulation, Deregulation, and Workable Competition", dans American Economic Review (mai 1981), p. 394-398.

LIPSEY, Richard G., et K. LANCASTER. "The General Theory of Second Best", dans Review of Economic Studies (1956-1957).

MEYER, J.R., et al. The Economics of Competition in the Transportation Industries, Harvard University Press, 1959.

MOHRING, H. "Optimisation and Scale Economies in Urban Bus Transportation", dans American Economic Review (sept. 1972), p. 591-604.

MOORE, T.G. Freight Transportation Regulation: Surface Freight and the Interstate Commerce Commission, American Enterprise Institute, 1972.

PANZAR, John C. "Equilibrium and Welfare in Unregulated Airline Markets", dans American Economic Review (mai 1979), p. 92-95.

PANZAR, John C., et R.D. WILLIG. "Economies of Scale and Economies of Scope in Multi-Output Production", Econ. Disc. Paper No. 33, Bell Laboratories, 1975.

PANZAR, John C., et R.D. WILLIG. "Economies of Scope", dans American Economic Review (mai 1981), p. 268-272.

PANZAR, John C., et R.D. WILLIG. "Free Entry and the Sustainability of Natural Monopoly", dans Bell Journal of Economics (printemps 1977), p. 1-22.

POSNER, R.A. "Natural Monopoly and Regulation", dans Stanford Law Review (fév. 1969), p. 548-563.

POSNER, R.A. "Theories of Economic Regulation", dans Bell Journal of Economics (automne 1974), p. 335.

RAMSEY, Frank. "A Contribution to the Theory of Taxation", dans Economics Journal (mars 1927), p. 47-61.

ROY, Roger. Économies d'échelle dans l'industrie du transport aérien, rapport de recherche n° 10-80-06F, Commission canadienne des transports, 1980.

SCHMALENSEE, R. "Comparative Static Properties of Regulated Airline Oligopolies", dans Bell Journal of Economics (automne 1977), p. 565-576.

SHARP, Clifford, H. Transport Economics, London, MacMillan, 1973.

SHEPHERD, W.G. "Public Enterprises: Purposes and Performance, and Strategy and Structure", notes d'une conférence sur Managing Public Enterprises: Purposes and Performance, Vancouver, Canada (août 1981). (Compte rendu à paraître, Institute for Research on Public Policy.)

SMEED, R.J., et al. Road Pricing: The Economic and Technical Possibilities, ministère des Transports HMSO, 1964.

STIGLER, G. "The Economic Theory of Regulation", dans Bell Journal of Economics (printemps 1971), p. 3-21.

SECRÉTARIAT DU CONSEIL DU TRÉSOR, DIRECTION DE LA PLANIFICATION. Benefit-Cost Analysis Guide, Ottawa, Approvisionnements et Services Canada, 1976.

TURVEY, R. Economic Analysis and Public Enterprise, Londres, George Allen and Unwin, 1971.

TURVEY, R., et H. MOHRING. "Optimal Bus Fares", dans Journal of Transport Economics and Policy (sept. 1975), p. 280-286.

VANAG, A.H "Maritime Congestion: An Economic Analysis", dans R.O. Goss (éd.), Advances in Maritime Economics, Cambridge University Press, 1977.

WALTERS, A.A. "The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion", dans Econometrica, p. 676-699.

WATERS, W.G. II. "Optimal Pricing Under Joint and Common Costs: A Geometric Analysis", document de travail, Oxford University, Transport Studies Unit, 1976.

WATERS, W.G. II. "Waiting Time and Increasing Returns in Scheduled Transport Services: A Geometric Treatment," dans International Journal of Transport Economics (à paraître, 1982).

WATERS, W.G. II, et A.D. WOODLAND. "Econometric Analysis and Railway Costing", monographie à paraître, Vancouver, Centre for Transportation Studies, 1982.

WHEATON, W.C. "Price Induced Distortion in Urban Highway Investment", dans Bell Journal of Economics (automne 1978), p. 622-632.

WINSTON, C. "The Welfare Effects of ICC Rate Regulation Revisited", dans Bell Journal of Economics (printemps 1981).

ZAJAC, E.E. "A Geometric Treatment of Averch-Johnson's Behavior of The Firm Model", dans American Economic Review (mars 1970), p. 117-125.

ZAJAC, E.E. Fairness or Efficiency: An Introduction to Public Utility Pricing, Cambridge, Ballinger, 1978.

LES MODÈLES DE RÉSEAU DANS LA PLANIFICATION DES TRANSPORTS ET LEUR APPLICATION INTERACTIVE OU GRAPHIQUE

Traduction de l'allocution prononcée

par

Michael Florian,
Centre de recherche sur les transports,
Université de Montréal

LES MODÈLES DE RÉSEAU DANS LA PLANIFICATION DES TRANSPORTS ET LEUR APPLICATION INTERACTIVE OU GRAPHIQUE*

L'intérêt que l'on porte aux modèles mathématiques dans la planification des réseaux de transport tient au besoin de prédire comment les personnes, les véhicules et les marchandises utiliseront les infrastructures nouvelles ou améliorées et, partant, d'évaluer la rentabilité des investissements nécessaires. À cette fin, il faut construire des modèles dont les uns représentent la demande en transport et les autres illustrent la façon dont les personnes, les véhicules et les marchandises utilisent les réseaux de transport. Si l'on réussit à construire ces modèles et qu'on soit raisonnablement certain de leur validité, on peut simuler des situations futures et, en conséquence, prédire les flux de circulation sur les liaisons présentes et futures du réseau, puis évaluer les avantages probables des divers projets d'amélioration.

La notion d'équilibre a joué un rôle prédominant dans la construction des modèles mathématiques illustrant le choix d'itinéraire dans les réseaux de transport. Supposons qu'on connaisse le volume de la demande entre un point d'origine et un point de destination. Il est essentiel de savoir comment les déplacements sont attirés vers les itinéraires concurrents entre ces points d'origine et de destination. La notion de l'équilibre du trafic remonte au moins à 1924, année où Knight [22] fit une description simple et intuitivement claire du comportement hypothétique du trafic dans des conditions d'encombrement:

> Supposons que deux points soient reliés par deux routes: la première est suffisamment large pour assurer l'écoulement de tout le trafic qui pourrait l'emprunter, mais est mal nivelée et mal

---

* Notes d'un séminaire tenu le 21 mai 1982 à la Commission canadienne des transports.

Une partie des travaux présentés dans ce document ont été réalisés avec la collaboration de H. Spiess, L. James-Lefebvre et A. Babin.

LES MODÈLES DE RÉSEAU DANS LA PLANIFICATION DES TRANSPORTS ET LEUR APPLICATION INTERACTIVE OU GRAPHIQUE*

L'intérêt que l'on porte aux modèles mathématiques dans la planification des réseaux de transport tient au besoin de prédire comment les personnes, les véhicules et les marchandises utiliseront les infrastructures nouvelles ou améliorées et, partant, d'évaluer la rentabilité des investissements nécessaires. À cette fin, il faut construire des modèles dont les uns représentent la demande en transport et les autres illustrent la façon dont les personnes, les véhicules et les marchandises utilisent les réseaux de transport. Si l'on réussit à construire ces modèles et qu'on soit raisonnablement certain de leur validité, on peut simuler des situations futures et, en conséquence, prédire les flux de circulation sur les liaisons présentes et futures du réseau, puis évaluer les avantages probables des divers projets d'amélioration.

La notion d'équilibre a joué un rôle prédominant dans la construction des modèles mathématiques illustrant le choix d'itinéraire dans les réseaux de transport. Supposons qu'on connaisse le volume de la demande entre un point d'origine et un point de destination. Il est essentiel de savoir comment les déplacements sont attirés vers les itinéraires concurrents entre ces points d'origine et de destination. La notion de l'équilibre du trafic remonte au moins à 1924, année où Knight [22] fit une description simple et intuitivement claire du comportement hypothétique du trafic dans des conditions d'encombrement:

> Supposons que deux points soient reliés par deux routes: la première est suffisamment large pour assurer l'écoulement de tout le trafic qui pourrait l'emprunter, mais est mal nivelée et mal

---

* Notes d'un séminaire tenu le 21 mai 1982 à la Commission canadienne des transports.

Une partie des travaux présentés dans ce document ont été réalisés avec la collaboration de H. Spiess, L. James-Lefebvre et A. Babin.

revêtue; la deuxième est bien meilleure, mais étroite et de capacité limitée. Si un grand nombre de camions circulent entre les deux points et sont libres de choisir l'un ou l'autre des deux itinéraires, ils tendent à se répartir sur les deux routes dans des proportions telles que le coût par unité de transport ou le rendement effectif de l'unité d'investissement sera le même pour tous les camions, quel que soit l'itinéraire emprunté. Au fur et à mesure qu'augmente le nombre de camions empruntant la route bonne mais étroite, celle-ci devient encombrée et il arrive un moment où il devient tout aussi rentable pour un camion d'utiliser la route plus large mais moins bonne.

Vingt-huit ans plus tard environ, Wardrop [34] énonça les deux principes qui ont donné corps à cette notion d'équilibre et introduisit le postulat du comportement optionnel fondé sur la minimisation du coût total. Son premier principe affirme que "les temps de parcours sur tous les itinéraires en fait utilisés sont égaux et sont inférieurs à ceux d'un seul véhicule sur n'importe quel itinéraire non utilisé." Ce principe sous-entend que les itinéraires en fait utilisés sont les plus courts, dans les conditions existantes de trafic, et sont perçus comme tels par l'usager. Ce concept d'équilibre dans le choix de l'itinéraire, ou d'équilibre du trafic, identique à la notion décrite par Knight, est devenu admis au cours des trente dernières années comme principe de comportement valide pour décrire la répartition du trafic sur les itinéraires concurrents. Les flux de circulation qui répondent à ce principe sont normalement désignés par flux "optimisés par l'usager", étant donné que chaque usager choisit l'itinéraire qui lui semble optimal. Par contre, les flux "optimisés pour le système" sont illustrés par le second principe de Wardrop, qui affirme que "le temps moyen de transport est minimal". Wardrop a comparé ces deux principes et conclu que le premier critère est très probable dans la pratique, vu qu'il sous-entend une situation d'équilibre où aucun conducteur ne peut réduire son temps de parcours en choisissant un autre itinéraire, et que le second critère est le plus efficace étant donné qu'il minimise le temps total de parcours.

Wardrop a énoncé les conditions d'équilibre pour un réseau général, mais il n'a pas proposé de méthode de calcul des flux correspondants. Beckmann, McGuire et Winsten [2] furent les premiers à construire et à analyser un modèle mathématique de l'équilibre du trafic d'un réseau. Parue en 1956, leur oeuvre féconde a ouvert la marche aux contributions subséquentes dans ce domaine qui furent apportées, pour la plupart, au cours des quinze dernières années.

Le présent séminaire se propose d'identifier les éléments des modèles de réseau utilisés dans la planification des transports, d'examiner leurs propriétés structurales et les méthodes le plus couramment utilisées pour leur solution et, enfin, de faire ressortir leurs applications actuelles et potentielles.

FORMULATION DES MODÈLES DE RÉSEAU

Malgré la nature temporelle de la quasi-totalité des phénomènes de trafic, les modèles de réseau le plus couramment utilisés sont des modèles stables. Il est commun de considérer une certaine période de temps, de déterminer les caractéristiques de la demande durant cette période et de déterminer le profil du flux de trafic qui résulte de l'interaction de la demande et des caractéristiques de l'encombrement de l'infrastructure de transport disponible.

Prenons un réseau de transport dont les liens se prêtent à l'écoulement d'un type de trafic (véhicules ou passagers). Les noeuds n, $n \in N$, représentent les points d'origine, de destination et d'intersection des liens; les liens a, $a \in A$, représentent l'infrastructure. Soit v_a le débit des déplacements sur le lien a, tandis que le coût du déplacement sur un lien est représenté par la fonction $s_a(v)$ du coût subi par l'usager, où v est le vecteur des flux des liens sur l'ensemble du réseau. Cette fonction de coût peut représenter le retard associé au voyage sur cet arc; elle est alors appelée fonction (volume-délai), mais elle peut représenter d'autres coûts comme la consommation de carburant. On suppose que la fonction vectorielle s(v) du coût subi par l'usager

$$(s_a(v') - s_a(v''))^T(v'-v'') \geq 0, \quad a \in A \tag{1}$$

est monotone, continue et différentiable.

Les demandes g_i, $i \in I$, entre les points d'origine et de destination, où I est l'ensemble des couples O-D (origine-destination), peuvent utiliser les chemins k, $k \in K_i$, où K_i est l'ensemble des chemins pour le couple O-D désigné par i ($K_i \neq \phi$). Les flux sur les chemins k, h_k, satisfont la conservation du flux et la non-négativité

$$\left.\begin{array}{ll} & \sum_{k \in K_i} h_k = g_i, \quad i \in I \\ \text{et} & h_k \geq 0 \ , \ k \in K_i, \ i \in I \end{array}\right\} \tag{2}$$

Les flux de liaison correspondants v_a sont donnés par la formule

$$v_a = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \delta_{ak} \cdot h_k, \quad a \in A \tag{3}$$

$$\text{où } \delta_{ak} = \begin{cases} 1 \text{ si le lien a appartient au chemin k} \\ 0 \text{ dans les autres cas.} \end{cases}$$

Le coût de chaque chemin $s_k(=s_k(v))$ est la somme des coûts subis par l'usager sur les liens qui composent le chemin.

$$s_k = \sum_a \delta_{ak} \cdot s_a(v), \quad k \in K_i, \ i \in I \tag{4}$$

Soit $u_i(=u_i(v))$ le coût du chemin le moins coûteux pour n'importe quel couple i d'O-D

$$u_i = \min_{k \in K_i} s_k, \quad i \in I \tag{5}$$

Les demandes g_i sont données par les fonctions G_i (u), où u est le vecteur des temps de parcours les moins coûteux pour tous les couples O-D du réseau

$$g_i = G_i(u), \quad i \in I \tag{6}$$

Les fonctions vectorielles G (u) de la demande

$$(G\ (u') - G\ (u''))^T (u_i' - u_i'') < 0, \quad i \in I \tag{7}$$

sont censées être strictement antitones, continues, différentiables et bornées supérieurement.

Pour formuler le modèle d'équilibre du réseau, on suppose que pour chaque couple O-D, le principe du flux optimisé par l'usager (principe de Wardrop) est vérifié, c'est-à-dire que

$$s_k^* - u_i^* \begin{cases} = 0 & \text{si} \quad h_k^* > 0 \\ \geq 0 & \text{si} \quad h_k^* = 0 \end{cases} \qquad k \in K_i, \quad i \in I \tag{8}$$

pour l'ensemble réalisable (2)-(3).

Il est relativement facile de démontrer que (8) peut être réarrangée selon le principe de la "complémentarité"

$$u_i^* \leq s_k^* \quad \text{et} \quad (s_k^*-u_i^*)h_k^* = 0, \quad k\epsilon K_i, \quad i\epsilon I \qquad (9)$$

et que (8) et (5) sont équivalentes à:

$$s_{k_1}^* \leq s_{k_2}^*, \text{ si } \quad h_{k_1}^* > 0, \quad k_1,k_2\epsilon K_i, \quad i\epsilon I \qquad (10)$$

Il s'ensuit que le premier principe de Wardrop peut être représenté mathématiquement sous plusieurs formes. Toutefois, la forme la plus utile du modèle d'équilibre du réseau s'effectue sous la forme d'une inégalité variationnelle (Smith [32], Dafermos [7], [8]). Pour ce faire, on note que l'équation (8) est équivalente à

$$(s_k^*-u_i^*)(h_k-h_k^*) \geq 0 \;, \quad k\epsilon K_i, \quad i\epsilon I \qquad (11)$$

où h_k représente n'importe quel flux d'itinéraire réalisable.
Si $h_k^* > 0$, on peut dire que $s_k^*=u_i^*$, étant donné que h_k peut être plus petit que h_k^*. Si $h_k^*=0$, l'équation (11) est vérifiée lorsque $s_k^* -u_i^* \geq 0$. En additionnant $k \epsilon K_i$ et $i \epsilon I$

$$\sum_{i\epsilon I} \sum_{k\epsilon K_i} s_k^*(h_k-h_k^*) \geq \sum_{i\epsilon I} u_i^*(g_i-g_i^*) \qquad (12)$$

En utilisant (3) et (4) et en modifiant l'ordre de l'addition à gauche, on obtient

$$\sum_{a\epsilon A} s_a(v^*)(v_a-v_a^*) \geq \sum_{i\epsilon I} u_i^*(g_i-g_i^*) \qquad (13)$$

Puisque la fonction vectorielle de la demande est antitone, on peut dire qu'elle est inversible. Soit $W(g)=u$ l'inverse de la fonction de la demande. En substituant à u la formule correspondante, le modèle d'équilibre du réseau peut être posé comme suit:

$$\sum_{a\in A} s_a(v^*)(v_a-v_a^*) - \sum_{i\in I} W_i(g^*)(g_i-g_i^*) \geq 0 \qquad (14)$$

pour l'ensemble réalisable (2)-(3).

On peut démontrer que (14) implique (8) en construisant un profil de flux qui diffère du flux d'équilibre sur un seul chemin k', $k' \in K_i$, pour lequel $h_{k'}=h_k^* + \delta$, $0 \leq |\delta| < h_k^*$. L'application de (14) donne $s_k^* \cdot \delta - W_i(g^*)\,\delta = 0$ qui est équivalente à (8).

En utilisant la notation matricielle, on peut récrire (14) sous la forme suivante

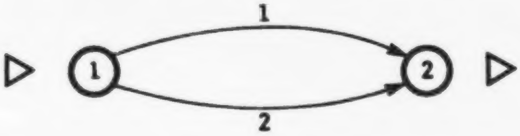
$$s(v^*)^T(v-v^*) - W(g^*)^T(g-g^*) \geq 0 \qquad (15)$$

Dans la section qui suit, on examinera certaines propriétés mathématiques du modèle d'équilibre du réseau.

CERTAINES PROPRIÉTÉS DU MODÈLE D'ÉQUILIBRE DU RÉSEAU

L'existence d'une solution du modèle d'équilibre du réseau est garantie par la continuité de la fonction des coûts subis par l'usager et de la fonction de la demande ainsi que par le fait que l'ensemble réalisable (2)-(3) est compact si les flux du cycle ne se produisent pas et que les fonctions de la demande soient bornées supérieurement (voir [1], [21]). L'exemple suivant démontre que lorsque la fonction des coûts subis par

l'usager n'est pas continue, les flux qui satisfont les conditions d'équilibre n'existent pas. Le réseau comporte une comporte un couple O-D et deux liaisons (figure ci-dessous).



$$s_1(v_1)=4v_1$$

$$s_2(v_2)=\begin{cases}4v_2, & v_2<20\\ 4v_2+10 & v_2\geq 20\end{cases}$$

La demande de déplacement de 1 à 2 est égale à 40. Lorsque $v_1=v_2=20$, les coûts subis par l'usager du lien 2 sont supérieurs aux coûts subis par l'usager du lien 1, mais lorsque $v_1=20+\varepsilon$ et $v_2=20-\varepsilon$, $\varepsilon>o$, les coûts du lien 1 sont supérieurs à ceux du lien 2.

Sur le plan pratique, la condition de continuité n'est pas un obstacle; en fait, toutes les fonctions des coûts subis par l'usager, qui ont été calibrées, sont continues; il en est de même des fonctions de la demande utilisées dans la pratique.

Une des caractéristiques importantes d'un modèle de réseau utilisé pour simuler les flux de circulation pour les différentes configurations de réseau susceptibles d'être envisagées à l'avenir est d'avoir, pour un scénario donné, des flux de circulation et des coûts origine-destination dont les niveaux sont uniques. À défaut de cette caractéristique, il sera difficile de comparer les diverses situations futures, et les différences entre les scénarios dépendront de la solution trouvée pour chaque cas ainsi que des différentes configurations de réseau. Heureusement, dans un grand nombre de situations intéressantes, le modèle d'équilibre du réseau a des flux, des demandes et des coûts origine-destination, qui sont tous uniques. Cette unicité se réalise lorsque les fonctions du coût subi par l'usager sont strictement monotones et les fonctions de la demande (ainsi que leurs inverses) sont strictement antitones, comme on le suppose dans la formulation du modèle.

Pour démontrer cela (voir Smith [22], Dafermos [8], et Aashtiani et Magnanti [1]), on suppose qu'il existe deux solutions distinctes (v', g') et (v",g"). En posant l'équation (15) une fois avec v=v', g=g' et v*=v", g*=g" et une fois avec v=v", g=g" et v*=v', g*=g', on obtient par suite de l'addition des deux inégalités

$$(s(v')-s(v''))^T(v'-v'') - (W(g')-W(g''))^T(g'-g'') \leq 0 \qquad (16)$$

Toutefois, compte tenu de (1) et (7), on déduit que (16) n'est vérifiée que si chaque terme est égal à zéro. Par conséquent:

$$(s\ (v')-s\ (v''))^T(v'-v'') = 0, \quad a\epsilon A \qquad (17)$$

et

$$(W\ (g')-W\ (g''))^T(g'-g'') = 0, \quad i\epsilon I \qquad (18)$$

On déduit donc de (18) que g'=g", et de (17) que $s_a(v')=s_a(v'')$, et que les coûts subis par l'usager de la liaison sont uniques. Étant donné que u_i^*, $i \epsilon I$ représentent les longueurs des plus courts chemins mesurés pour chaque couple i d'O-D en fonction des coûts $s_a(v^*)$ subis par l'usager, elles sont également uniques. On remarque que si les fonctions des coûts subis par l'usager sont strictement monotones, les flux de liaison sont également uniques.

Il est important de noter que, de manière générale, les flux par chemin h_k ne sont pas uniques. Partant des flux d'équilibre par lien, les flux correspondants par chemin passent pour être la solution des équations linéaires simultanées.

$$v_a^* = \sum_{i\epsilon I} \sum_{k\epsilon K_i} \delta_{ak} \cdot h_k^*, \quad a\epsilon A \qquad (19)$$

Habituellement, le nombre de chemins utilisés est bien plus grand que le nombre des liens du réseau, et en (19), le nombre de variables h_k^*

dépasse de loin le nombre de contraintes qui est égal à $|A|$. La conséquence de ce fait est que, dans l'analyse des configurations particulières de réseau, les chemins utilisés peuvent être obtenus, encore qu'ils ne représentent pas une information fiable, étant donné qu'ils ne sont pas nécessairement uniques.

Une autre propriété importante du modèle d'équilibre du réseau est le fait qu'il est stable. Les flux d'équilibre du trafic dépendent continuellement de la fonction de la demande en déplacement et de la fonction du coût de déplacement. En termes généraux, les faibles modifications apportées à la fonction de la demande en déplacement et à la fonction du coût subi par l'usager entraînent de faibles modifications dans les flux de trafic. Ce fait a été démontré récemment par Dafermos et Nagurney [6] pour le modèle d'équilibre global traité dans la présente section et par Hall [20] pour une version du modèle d'équilibre du réseau traitée dans la prochaine section. Cette propriété est très désirable dans les applications, à condition que le modèle représente de façon pertinente le comportement observé dans le choix de l'itinéraire.

SOLUTIONS RELATIVES AUX FLUX D'ÉQUILIBRE

Les applications pratiques du modèle d'équilibre du réseau ont été surtout réalisées en fonction de versions plus simples du modèle (15) assujetties aux contraintes (2)-(3). Les fonctions du coût subi par l'usager, qui ont été calibrées, sont des fonctions limitées au flux par lien, c'est-à-dire $s_a(v)=s_a(v_a)$, $a \in A$, et les fonctions de demande dépendent uniquement du coût du déplacement entre l'origine et la destination du couple de noeuds i, c'est-à-dire $G_i(u)=G_i(u_i)$, $i \in I$. Les hypothèses relatives aux propriétés de la fonction peuvent être posées de nouveau de façon plus simple de manière à exiger que toutes les fonctions du coût subi par l'usager soient continues et croissantes et que les fonctions de la demande soient continues, strictement

décroissantes et majorées. L'inégalité variationnelle (14) peut désormais être récrite sous la forme suivante:

$$\sum_{a\in A} s_a(v_a^*)(v_a - v_a^*) - \sum_{i\in I} W_i(g_i^*)(g_i - g_i^*) \geq 0 \qquad (20)$$

par rapport à l'ensemble (2)-(3).

L'application pratique de ce modèle a été facilitée par l'équivalence entre cette inégalité variationnelle et une fonction convexe d'optimisation du coût, dont la condition d'optimalité est (20). Cette fonction d'optimisation est

$$\text{Min } Z = \sum_{a\in A} \int_0^{v_a} s_a(x)dx - \sum_{i\in I} \int_0^{g_i} W_i(y)dy \qquad (21)$$

sujet aux contraintes (2)-(3).

Étant donné que les fonctions du coût subi par l'usager sont croissantes et que les fonctions de la demande sont strictement décroissantes, la fonction objective (21) est convexe et l'équation (20) s'interprète comme la condition d'optimalité de premier ordre, c'est-à-dire que la dérivée directionnelle de Z est positive ou nulle (voir la propriété 6 de l'appendice I). On peut trouver une démonstration rigoureuse de cette équivalence dans l'ouvrage de Kinderlehrer et Stampacchia [21]. C'est le résultat classique obtenu par Beckmann et al. [2]. Les conditions de Kuhn-Tucker de la fonction convexe d'optimisation du coût (21) sujet aux contraintes (2)-(3) (voir l'appendice III) sont équivalentes au principe du choix d'itinéraire optimisé par l'usager, tel que posé par Wardrop (formule (8)).

L'existence de la fonction équivalente d'optimisation a grandement facilité l'application du modèle d'équilibre du réseau, étant donné qu'on dispose d'un grand nombre d'algorithmes efficaces pour la solution de tels

problèmes, tandis qu'il est plus difficile de résoudre les inégalités variationnelles de grande taille. On peut dire sans réserve que les applications pratiques du modèle d'équilibre du réseau sont basées, pour la plupart, sur les travaux fondamentaux de Beckmann et al., bien que récemment, la formulation de l'inégalité variationnelle ait ouvert la voie à la compréhension et à la résolution de modèles d'équilibre de réseau de complexité croissante.

Du long répertoire des méhodes dont on dispose pour la solution des fonctions convexes d'optimisation du coût, sujet à des contraintes linéaires, l'algorithme le plus couramment utilisé est l'adaptation de la méthode d'approximation linéaire de Frank et Wolfe [18] et de certaines de ses variantes. Bruvnooghe, Gibert et Sakarovitch [4] furent les premiers à proposer la méthode; toutefois, les travaux subséquents de LeBlanc, Morlock et Pierskalla [24] et de Nguyen [29] ont généralisé la pratique de cette méthode. (Voir également [25], [30] et [9] pour les détails d'une autre approche.) Des logiciels sont largement disponibles pour la solution de la version de ce problème, dans le cas où la demande est fixe, c'est-à-dire dans les cas où $g_i = \bar{g}_i$, $i \in I$. Nous allons présenter les détails de l'adaptation de cette méthode pour la solution du problème d'équilibre du réseau à demande fixe puis discuter certaines de ces variantes et cela, en fonction de la demande fixe et de la demande variable.

Examinons à présent la fonction d'équilibre du réseau à demande fixe:

$$\text{Min } Z = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} s_a(x)dx \qquad (22)$$

sujet aux contraintes

$$\sum_{k \in K_i} h_k = \bar{g}_i, \quad i \in I \qquad (23)$$

$$h_k \geq 0, \ k \in K_i, \ i \in I \tag{24}$$

et l'on se rappelle (3), c'est-à-dire

$$v_a = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \delta_{ak} \cdot h_k, \quad a \in A .$$

Comme nous l'avons décrit dans l'appendice II, si on demeure avec une solution initiale réalisable, la méthode d'approximation linéaire obtient une direction réalisable en linéarisant la fonction objective, en résolvant un sous-problème de programmation linéaire puis en trouvant une solution améliorée sur le segment séparant la solution courante et la solution du sous-problème. Pour le problème d'équilibre du réseau, le sous-problème linéarisé pour une itération ℓ est

$$\text{Min} \sum_{a \in A} s_a(v_a^\ell) \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \delta_{ak} \cdot f_k \tag{25}$$

sujet aux contraintes

$$\sum_{k \in K_i} f_k = \bar{S}_i, \ i \in I \tag{26}$$

$$f_k \geq 0, \ k \in K_i, \ i \in I \tag{27}$$

En changeant l'ordre d'addition dans (25) et en utilisant (4), la fonction objective devient

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} s_k^\ell \cdot f_k \tag{28}$$

La solution de cette fonction s'obtient simplement en calculant les plus courts chemins pour chaque couple i d'O-D et en affectant à ces chemins

la demande $\bar{g}_i$. Rappelons que les conditions de manque de complémentarité pour les contraintes duales de ce programme linéaire sont

$$f_k(u_i - s_k^{\ell}) = 0, \quad k \in K_i \;, \quad i \in I \tag{29}$$

et que les contraintes duales sont

$$u_i \leq s_k^{\ell}, \qquad k \in K_i \;, \quad i \in I \tag{30}$$

Les u_i optimaux sont les longueurs des plus courts chemins en fonction des coûts actuels $s_a(v_a^{\ell})$ subis par l'usager du lien, et l'équation (29) représente le principe du flux optimisé par l'usager (principe de Wardrop) lorsque les coûts subis par l'usager des liens sont constants.

La solution des fonctions (25)-(27) est donc donnée par l'équation

$$f_a^{\ell} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \delta_{ak} \, f_k \tag{31}$$

et la direction de descente est simplement $d_a^{\ell} = (f_a^{\ell} - v_a^{\ell})$.

Les calculs des plus courts chemins, qui sont nécessaires à la solution de ce sous-problème, peuvent s'effectuer par n'importe laquelle des méthodes efficaces actuellement disponibles.

L'itération de l'algorithme d'approximation linéaire est complétée en résolvant

$$\min_{0 \leq \lambda \leq 1} \sum_a \int_0^{v_a^{\ell} + \lambda d_a^{\ell}} s_a(x)dx) \tag{32}$$

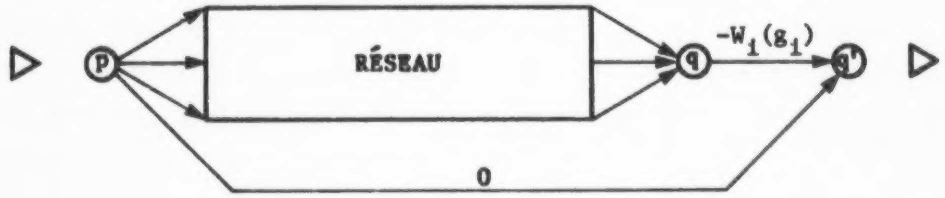
ou encore en annulant son gradient, c'est-à-dire en trouvant pour lequel

$$\sum_{a \in A} s_a(v_a^\ell + \lambda^\ell d_a^\ell)\, d_a^\ell = 0 \qquad (33)$$

Pour des raisons numériques, il est préférable de trouver λ par la formule (33). On répète la linéarisation pour $\ell = 1,2,\ldots$ jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante.

Cet algorithme offre plusieurs avantages. Les chemins nécessaires sont générés au fur et à mesure des besoins et ne doivent pas être conservés d'une itération à la suivante. Il s'ensuit que les besoins de stockage sont minimes et n'augmentent pas avec le nombre d'itérations. On ne doit conserver, à chaque itération, que les flux par chemin v_a^ℓ, en plus des coûts des liens $s_a(v_a^\ell)$ et le réseau. L'un des inconvénients de cet algorithme est qu'il converge lentement près de la solution optimale. Sur le plan pratique, cet inconvénient n'est pas grave, étant donné que les modèles de grande taille n'ont pas besoin de solutions très précises.

Le modèle à demande variable est légèrement plus difficile à résoudre que le modèle à demande fixe. Du point de vue pédagogique, la transformation suivante du modèle à demande variable en un modèle à demande fixe est instructive (voir Dantzig et al. [10]). Comme le montre la figure ci-après, on ajoute un noeud et deux chemins à chaque couple i d'O-D.



Pour le couple i, le noeud d'origine est p et le noeud de destination est q. On ajoute un noeud q' et les chemins (p,q') et (q,q'). Le coût d'utilisation du chemin (p,q') est nul et la fonction du coût subi par l'usager du chemin (q,q') est $-W_i(g_i)$. Une demande de g_i^{max}, qui est une limite supérieure de la demande d'équilibre, est assignée de p à q. La solution de ce modèle à demande fixe se distingue par le fait que tous les chemins utilisés sont de longueur 0; par conséquent, tout chemin sur le réseau original qui écoule le flux a une longueur u_i^* et on a donc $u_i^*=W_i(g_i^*)$ ou $g_i^*=G_i(u_i^*)$.

Cette transformation n'est pas efficace, étant donné que le lien (p,q') n'est pas nécessaire dans l'adaptation directe de la méthode d'approximation linéaire à la solution du modèle à demande variable, laquelle exige uniquement l'addition du chemin (q,q') ou, pour tous les couples O-D, l'addition d'une matrice de dimensions $|I| \times |I|$ qui contient la matrice courante O-D à chaque itération. Pour le modèle d'équilibre du réseau à demande variable, le problème linéarisé, pour itération, est

$$\text{Min} \sum_{a\in A} s_a(v_a^\ell) \sum_{i\in I} \sum_{k\in K_i} \delta_{ak}\cdot f_k - \sum_{i\in I} W_i(g_i^\ell)\, w_i \tag{34}$$

sujet aux contraintes

$$\sum_{k\in K_i} f_k - w_i = 0, \qquad i\in I \tag{35}$$

$$f_k \geq 0, \;\; k\in K_i, \; i\in I, \; w_i \geq 0, \;\; i\in I \tag{36}$$

Comme auparavant, la fonction objective (34) se simplifie, après quelques manipulations, et on obtient

$$\text{Min} \sum_{i\in I} \Big(\sum_{k\in K_i} s_k^\ell\, f_k - W_i(g_i^\ell) w_i \Big) \tag{37}$$

Ce problème peut être résolu en considérant u_i comme étant les longueurs des plus courts chemins, en fonction du coût actuel de lien $s_a(v_a^\ell)$, et en considérant que la demande est affectée à ces plus courts chemins selon l'équation suivante où g_i^{max} est une borne supérieure de g_i.

$$w_i^\ell = \begin{cases} g_i^{max} & \text{si} \quad u_i < W_i(g_i^\ell) \\ g_i^\ell & \text{si} \quad |u_i - W_i(g_i^\ell)| < \varepsilon \quad i \in I \\ 0 & \text{si} \quad u_i > W_i(g_i^\ell) \end{cases} \tag{38}$$

La direction de descente est représentée par $\{(f_a^\ell - v_a^\ell), (w_i^\ell - g_i^\ell)\}$ où f_a^ℓ s'obtient en assignant la demande w_i^ℓ aux plus courts chemins. La dimension du pas s'obtient en trouvant λ^ℓ qui annule le gradient

$$\sum_{a \in A} s_a(v_a^\ell + \lambda(f_a^\ell - v_a^\ell))(f_a^\ell - v_a^\ell) - \sum_{i \in I} W_i(g_i^\ell + \lambda(w_i^\ell - g_i^\ell))(w_i^\ell - g_i^\ell) \tag{39}$$

Une variante intéressante de la méthode d'approximation linéaire pour la résolution du modèle d'équilibre du réseau à demande variable est la méthode d'approximation linéaire partielle qui fut proposée en premier lieu par S. Evans [14] pour la solution du modèle combiné de distribution ou affectation des déplacements. Ce modèle est une variante du modèle à demande variable où les fonctions de la demande sont considérées comme étant la fonction exponentielle négative du coût du déplacement de l'origine à la destination, c'est-à-dire $G_i(u_i) \cong \exp(-\theta u_i)$, et des contraintes additionnelles sont imposées à l'ensemble des déplacements sortant des origines p et se terminant aux destinations q. Ce modèle peut être exprimé comme suit:

$$\text{Min} \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} s_a(x)dx + \theta \sum_{i \in I} g_i \ \ell n \ g_i \tag{40}$$

sujet aux contraintes

$$\sum_{k\in K_i} h_k - g_i = 0\ ,\quad i\in I \tag{41}$$

$$\left.\begin{array}{l} \sum_p g_{pq} = D_q,\quad \forall q \\ \sum_q g_{pq} = O_p,\quad \forall p \end{array}\right\} i=(p,q) \tag{42}$$

$$h_k \geq 0,\ k\in K_i,\ i\in I;\quad g_i \geq 0,\ i\in I \tag{43}$$

(Voir également [17].) Bien qu'il ait fait l'objet d'études approfondies, ce modèle n'a pas encore été appliqué.

Selon une interprétation de Stewart [33], l'algorithme d'Evans serait une approximation linéaire partielle où, pour le modèle de la demande variable, les fonctions du coût d'utilisation sont linéarisées mais les fonctions inverses de la demande ne le sont pas. Le sous-problème qui en résulte peut être exprimé comme suit:

$$\text{Min} \sum_{a\in A} s_a(v_a^{\ell}) \sum_{i\in I} \sum_{k\in K_i} \delta_{ak}\cdot f_k - \sum_{i\in I} W_i(w_i) \tag{44}$$

sujet aux contraintes

$$\sum_{k\in K_i} f_k - w_i = 0,\quad i\in I \tag{45}$$

$$f_k \geq 0,\ k\in K_i,\ i\in I;\quad w_i \geq 0,\ i\in I \tag{46}$$

Ce sous-problème est encore facile à résoudre en considérant u_i comme étant la longueur des plus courts chemins, en fonction du coût actuel

de liaison s_a (v_a^ℓ) puis en considérant que la demande est affectée à ces plus courts chemins selon l'équation suivante

$$w_i^\ell = G_i(u_i), \quad i \epsilon I \tag{47}$$

On a l'intuition que cette direction est meilleure, étant donné que le sous-problème servant à trouver la direction est plus "rapproché" du modèle initial. Les résultats du calcul [19], [23] confirment cette impression. Comme ce sous-problème n'est pas plus difficile à résoudre que les sous-problèmes de l'approximation linéaire, il est plus intéressant à utiliser dans la pratique courante.

Une autre variante de la méthode d'approximation linéaire, qui est particulièrement utile pour la version à demande variable de ce modèle, est la variante PARTAN ou de la tangente parallèle. À chaque étape de l'algorithme d'approximation linéaire, une autre direction de la décroissance est générée par chaque autre solution $v^{\ell-2}$ et v^ℓ. Ainsi, la nouvelle solution est produite par le calcul de α^ℓ, $\alpha^\ell \leq \bar{\alpha}$ qui minimise la fonction objective pour la solution $v^{\ell-2}+\alpha(v^\ell-v^{\ell-2})$, où $\bar{\alpha}$ est le plus grand pas admis pour conserver la non-négativité des flux de chemin. À noter qu'il n'est pas certain que cette direction soit une direction de descente et, surtout si $\alpha^\ell < 1$, que la fonction objective décroît dans la direction opposée. L'application de cette variante exige le stockage de tous les poids donnés à chaque solution du sous-problème de détermination de la direction ainsi que le stockage des dimensions d'étapes α^ℓ(méthodes PARTAN) et des solutions $v^{\ell-1}$ et $v^{\ell-2}$. Les résultats des calculs effectués selon cette méthode indiquent qu'elle constitue une variante intéressante de la méthode de base. Ses besoins de stockage supplémentaire sont minimes pour le modèle d'équilibre du réseau à demande fixe et pour les modèles de taille moyenne. Elle est également convenable pour les modèles d'équilibre du réseau à demande variable.

FLUX OPTIMISÉS PAR LE SYSTÈME ET FLUX OPTIMISÉS PAR L'USAGER

Le second principe de Wardrop est habituellement considéré comme un principe qui génère des flux "optimisés par le système", étant donné que ce sont les flux qui minimisent les frais totaux imputés au système. La version à demande fixe de ce modèle s'exprime par

$$\text{Min} \sum_{a \in A} v_a \cdot s_a(v_a) \tag{48}$$

sujet aux contraintes (23), (24).

En appliquant les conditions de Kunh-Tucker au problème des flux optimisés par le système, on obtient des flux optimisés par le système qui ont des coûts marginaux égaux sur tous les chemins utilisés, c'est-à-dire

$$m_k = \sum_a \delta_{ak} \, (s_a(v_a) + v_a \cdot s_a'(v_a)) \tag{49}$$

et
$$m_k^* - u_i^* \begin{cases} = 0 & \text{si} \quad h_k^* > 0 \\ \geq 0 & \text{si} \quad h_k^* = 0, \; k \in K_i, \; i \in I \end{cases} \tag{50}$$

On peut calculer les flux optimisés par le système, à l'aide de l'algorithme d'approximation linéaire, en apportant la modification appropriée à la fonction objective et en utilisant les coûts marginaux des liens dans le sous-problème d'identification de la direction de descente. Étant donné que les flux optimalisés par le système sont plus "rentables" (en ce sens que les déplacements occasionnent des frais globaux minimaux) que les flux optimalisés par l'usager si l'on peut imposer pour chaque liaison un péage égal à $v_a \cdot s_a'(v_a)$, les usagers cherchant à optimiser

leurs itinéraires se répartissent sur les chemins du réseau selon des flux optimisés par le système. La difficulté d'ordre pratique associée à l'imposition de ces péages est que les péages tendent à changer également les fonctions initiales du coût subi par l'usager. Les économistes désignent ces péages par coûts marginaux, notion qui remonte à 1844, année de parution des travaux de Dupuit [13]. Voir également [27].

De manière générale, dans un réseau donné, les flux optimisés par l'usager sont différents des flux optimisés par le système. S'il s'agit de réseaux étendus et non encombrés, la différence peut être minime étant donné que pour les liens affectés d'un coût de déplacement constant, il n'existe aucune différence entre les flux optimisés par le système et les flux optimisés par l'usager. Toutefois, ces différences sont importantes lorsqu'on évalue divers scénarios impliquant des additions ou annulations de liens. Braess [3] (voir également Murchland [26]) a donné un exemple classique de ces différences, en utilisant le réseau schématisé ci-après sur lequel on indique pour chaque lien la fonction du coût subi par l'usager.

Les flux d'équilibre comportent trois unités sur le chemin (1,2)(2,4) et trois unités sur le chemin (1,3)(3,4). Le coût total est 6 x 83 = 498. Si l'on ajoute au réseau le lien (2,3) affecté d'une fonction de coût subi par l'usager $v_{23}+10$, les flux d'équilibre comporteront deux unités sur chacun des chemins du réseau avec un coût total de 6 x 92 = 552.

Ainsi, l'addition d'un lien augmente le coût total de déplacement ainsi que le coût de déplacement subi par chaque usager. D'une façon analogue, la suppression du lien (2,3) réduit le coût total de déplacement et le coût de déplacement subi par chaque usager. Pour comprendre ce paradoxe apparent, il suffit d'examiner les flux optimalisés par le système qui comportent respectivement trois unités sur les chemins (1,2)(2,4) et (1,3)(3,4) même en présence du lien (2,3). Il n'y a aucune raison de supposer que l'addition d'un lien puisse réduire le coût total de déplacement, étant donné que ce coût n'est pas minimisé par les flux optimisés par l'usager.

Le paradoxe de Braess revêt une grande importance dans les décisions relatives à l'addition ou à la suppression des liens dans un réseau donné. Si le principe du flux optimisé par l'usager convient pour la représentation comportementale du choix de l'itinéraire, il serait avantageux, pour un réseau donné, de limiter l'utilisation de certains liens et l'on doit veiller à évaluer avec précision les additions de réseau afin de détecter l'augmentation du niveau de service pour certains usagers. Comme le confirment les travaux de Fisk et Pallottino [15], le paradoxe de Braess peut certainement se produire dans des réseaux réels.

L'autre question pertinente touchant les flux optimisés par le système est la forme du modèle à demande variable. Pour ce modèle, la fonction objectif appropriée s'exprime par

$$\text{Min} \sum_{a \in A} v_a \cdot s_a(v_a) - \sum_{i \in I} \int_0^{g_i} w_i(y)dy \tag{51}$$

sujet aux contraintes (2), (3).

En appliquant les conditions de Kuhn-Tucker à ce modèle, on obtient (50) et

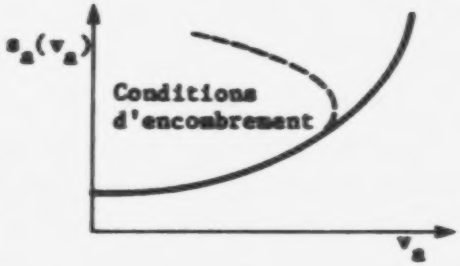
$$\left.\begin{aligned} G_i(u_i^*) &= g_i^* \\ \text{où} \quad u_i^* &= \min_{k \in K_i} m_k^* \end{aligned}\right\} i \in I \qquad (52)$$

ce qui veut dire que le coût subi par l'usager est le coût marginal plutôt que le coût moyen. Ce modèle est applicable aux réseaux ferroviaires où on peut avancer que les tarifs sont proportionnels aux coûts marginaux.

APPLICATION ET VALIDATION DU MODÈLE D'ÉQUILIBRE DU RÉSEAU

Les études actuelles qui servent de base à la validation empirique du modèle d'équilibre du réseau sont relativement rares. Florian et Nguyen [16] ont appliqué le modèle au réseau urbain de la ville de Winnipeg et Dow et Van Vliet [12] l'ont appliqué au réseau de la ville de Leeds. Un des problèmes d'ordre pratique occasionnés par l'application du modèle d'équilibre du réseau est la détermination de la matrice origine-destination. Même lorsqu'elles sont disponibles, les données d'enquête ne comportent pas d'informations sur tous les déplacements effectués durant l'heure de pointe, et les prévisions de flux doivent être conciliées avec les flux observés sur les liens. Le calibrage d'un modèle d'équilibre du réseau exige la représentation du réseau, le calibrage et l'affectation des fonctions-coût d'utilisation aux liens du réseau et le rajustement éventuel de la matrice origine-destination. On peut dire que l'on procède fréquemment à certaines approximations importantes pour construire la base de données nécessaire à l'application du modèle. Néanmoins, c'est peut-être le meilleur instrument dont on dispose actuellement pour prévoir l'impact à court et à long terme des changements introduits sur le réseau. Les débits sur les liens, qui sont obtenus par les études [16], [12], simulent très bien les flux sur les liens encombrés et les temps de déplacement de l'origine à la destination sont reproduits de façon satisfaisante.

L'application du modèle d'équilibre du réseau part de l'hypothèse que le trafic s'écoule librement sans encombrement grave. Si cette hypothèse n'est pas satisfaite, les fonctions croissantes du coût subi par l'usager ne modélisent pas correctement le phénomène de l'accroissement du temps de déplacement et de la réduction du flux de circulation sur les liaisons sujettes à l'encombrement (voir le diagramme ci-dessous).



Sur le plan des frais d'ordinateur, l'utilisation du modèle d'équilibre du réseau n'est pas particulièrement onéreuse. Pour un réseau de taille moyenne (200 couples origine-destination, 1 500 noeuds et 4 000 liens) mis en oeuvre sur un ordinateur typique, l'expérience montre que le coût de 10 à 15 itérations de la méthode d'approximation linéaire se situe entre 150 et 300 $. Ces coûts seraient encore moindres si l'on effectuait ces calculs sur les nouveaux micro-ordinateurs à 16 bits.

Le modèle d'équilibre du réseau peut également servir à mesurer les retombées sur la consommation de carburant, en incorporant d'une façon appropriée les équations empiriques de la consommation de carburant établies par Chang et al. [5].

MULTI-RÉPARTITION DES FLUX AVEC DES COÛTS DE LIAISON CONSTANTS

Les flux d'équilibre générés par l'usager conviennent à la représentation du comportement associé au choix des itinéraires, lorsque l'encombrement augmente substantiellement les coûts de déplacement. Lorsque les coûts subis par l'usager des liens sont constants, on satisfait le principe du flux optimisé par l'usager en affectant tous les flux au plus court chemin entre les points d'origine et les points de destination (revoir (25)-(27) et (28), (29)). Comme il est rare en pratique que les voyageurs

connaissent exactement les temps de parcours des liens, il est normal qu'on utilise plus d'un itinéraire, même en l'absence d'encombrement. Dial [11] a proposé un modèle de choix d'itinéraire basé sur le modèle de répartition du trafic qui suppose que

$$h_{k'} = \bar{g}_i \cdot \exp(-\theta s_{k'}) / \sum_{k \in K_i} \exp(-\theta s_k) \tag{53}$$

sujet aux contraintes habituelles de conservation et de non-négativité du flux (23), (24). Ce modèle équivaut à la fonction d'optimisation

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} h_k \, (\ell n \, h_k + \theta s_k) \tag{54}$$

sujet aux contraintes (23), (24). La solution de ce modèle exige le stockage explicite des données relatives aux chemins. Dial a ingénieusement évité ce problème en réduisant le nombre de chemins à considérer et, de cette façon, a réussi à résoudre cette version réduite du modèle sans devoir énumérer les chemins.

Bien qu'il soit très largement utilisé, le modèle de choix d'itinéraire basé sur la répartition du trafic rend les flux très sensibles à la représentation du réseau. Par ailleurs, la restriction du nombre de chemins rend le modèle instable, et toute modification légère apportée au réseau peut se traduire par un important changement des flux obtenus.

APPLICATION GRÂCE AUX RÉSEAUX À DIAGRAMME INTERACTIF

Les modèles de réseau utilisés dans la planification des transports ont connu un développement rapide au cours de la dernière décennie. On dispose d'une large gamme de méthodes de planification pour les divers réseaux de transport urbains et régionaux, et la plupart de ces méthodes ont été conçues pour être mises en oeuvre sur des ordinateurs modernes dans un contexte de traitement par lot. Il est vrai que ces méthodes ont été

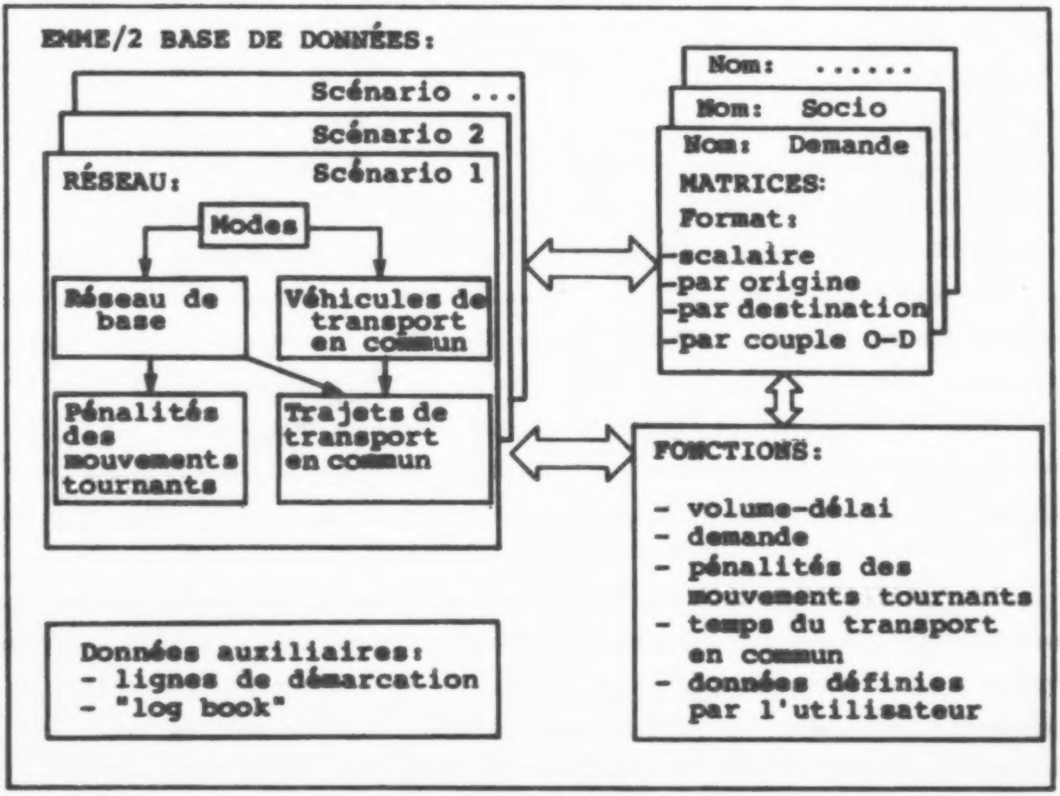
appliquées avec succès à un grand nombre de domaines et que la nouvelle génération de modèles de transport urbain (comme UTPS et EMME/1) a résolu dans une large mesure les difficultés associées à leur validité comportementale et à leur capacité de rendement sur le plan des calculs, mais le dialogue avec le planificateur ne manque pas d'incommodité. L'acheminement de l'information entre l'homme et l'ordinateur exige des procédés relativement complexes et parfois le recours à des analystes qui ne s'intéressent guère à la planification et, par ailleurs, est exposé aux contraintes gestionnelles des installations informatiques en cause. La situation typique qui nécessite l'utilisation de ces modèles informatisés est l'évaluation des scénarios futurs, activité qui peut refléter les changements dans les réseaux routiers et de transport en commun ou les changements dans les paramètres socio-économiques de la zone urbaine. Dans ces situations, il faut prévoir une communication rapide et efficace avec les modèles informatisés qui "évaluent" les scénarios proposés.

L'approche qui a prédominé durant les quelques dernières années, surtout dans le contexte de la planification des itinéraires du transport en commun, consiste à utiliser les techniques interactives-graphiques pour permettre la communication directe, à l'aide de réponses en temps réel graphiques ou non graphiques entre le planificateur et la méthode de planification mise en oeuvre sur ordinateur. Cette approche permet au planificateur d'intervenir dans le processus de planification par l'intermédiaire d'une terminologie qui lui est familière et qui le soulage des tâches imposées par le traitement informatique des données. Une fois que la base de données est établie, le planificateur n'a pas besoin de s'informer ou de se préoccuper des détails techniques des programmes ou des sytèmes d'ordinateurs. Par ailleurs, cette approche permet au planificateur de récupérer instantanément les données d'entrée, les résultats des calculs et les informations extraites de la base de données et ce, sous forme de graphiques ou de listes. EMME/2 est une méthode de planification du transport urbain multimodal, conçue pour les applications interactives. Elle est plus complète que les autres méthodes à base de graphiques interactifs élaborées jusqu'à présent.

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA CONCEPTION DU EMME/2

Les données qui peuvent être saisies, modifiées et utilisées pour les calculs dans le EMME/2 tombent sous trois catégories: les réseaux, les matrices et les fonctions. Le diagramme 1 ci-après est une représentation schématique de la base des données du EMME/2; il aide à clarifier les descriptions qui suivent.

Diagramme 1



On peut saisir, modifier et afficher les données du réseau à l'aide de l'éditeur de réseau du EMME/2. À l'aide de l'éditeur de matrice, on peut introduire, modifier et afficher les matrices de la base des données du EMME/2 et effectuer les divers calculs matriciels, et à l'aide de l'éditeur de fonction on introduit et évalue toutes les fonctions pertinentes du EMME/2. La base des données du EMME/2 contient des lignes de démarcation et un "log book" appelés données auxiliaires. Les lignes de démarcation peuvent être superposées sur les affichages graphiques pour en faciliter la lecture, et le "log book" sert à enregistrer régulièrement l'usage fait des divers modules de EMME/2 dans l'exploitation de la base de données. Voici une brève description des réseaux, des matrices et des fonctions qui peuvent être introduites et exploitées par le système EMME/2.

Les réseaux

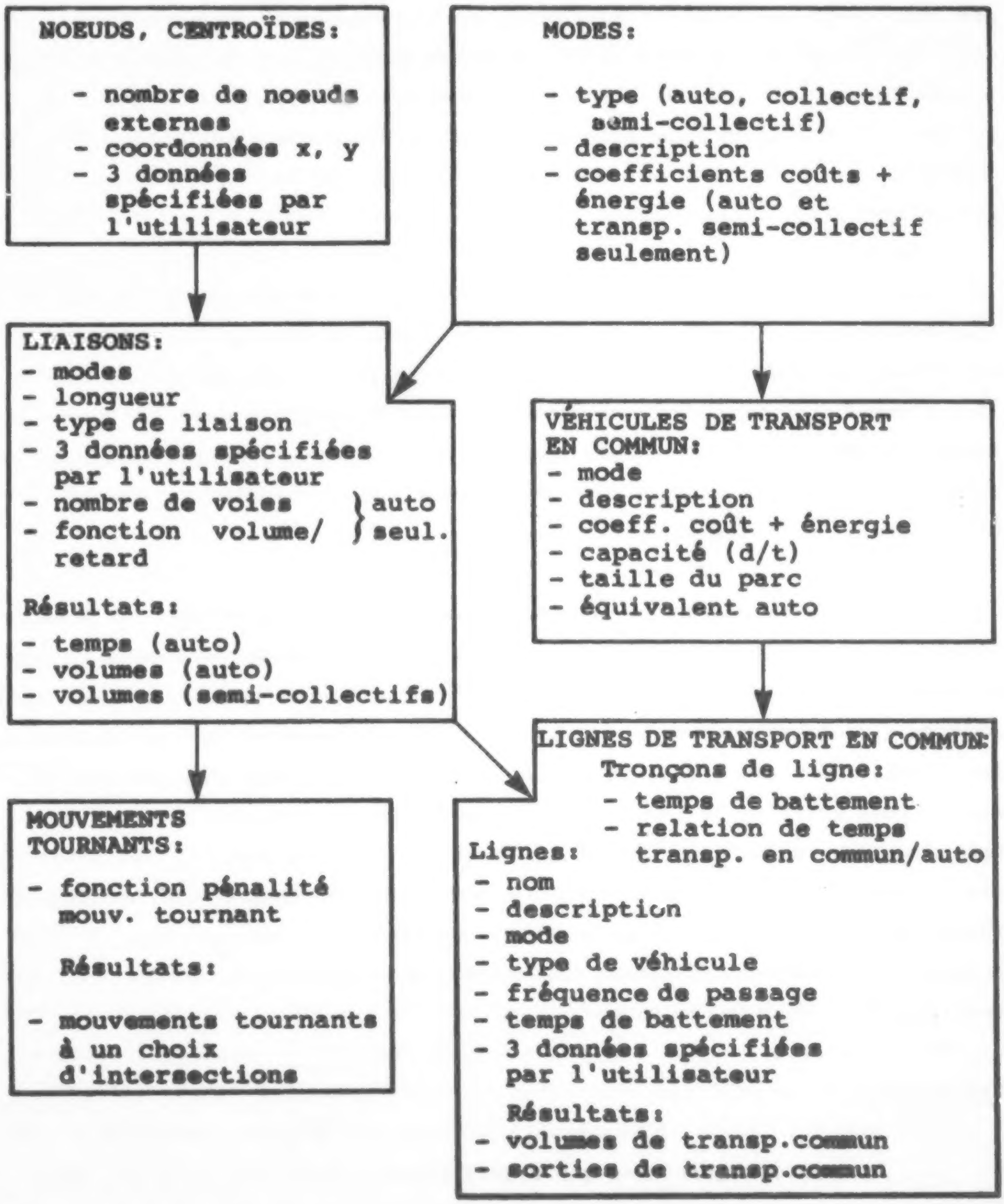
L'infrastructure de transport de la région à l'étude est représentée par un réseau multimodal. Les éléments descriptifs du réseau sont les modes, le réseau de base, les véhicules de transport en commun, les trajets des transports en commun et les pénalités des mouvements tournants. N'importe laquelle de ces données peut être modifiée n'importe quand, à condition de respecter la hiérarchie de la structure des données (par exemple, un trajet de transport en commun ne peut servir à un type de véhicule ne figurant pas sur la liste des véhicules). Voir le diagramme 2.

Le réseau de base est défini par la liste de tous les noeuds et de tous les liens entre ces noeuds, quel que soit le mode de transport qui les utilise. Les intersections qui sont décrites en association avec les mouvements tournants sont préparées séparément. Les "pénalités des mouvements tournants" sont indiquées uniquement pour les mouvements pénalisés.

L'itinéraire de ligne de transport en commun est défini comme étant une séquence de noeuds. Il n'est pas nécessaire de spécifier tous les noeuds d'un itinéraire. Si certains noeuds sont omis, on suppose que le trajet passe par les noeuds en empruntant le plus court chemin entre les noeuds spécifiés. La durée d'arrêt en station et le temps de parcours, qui

Diagramme 2

EMME/2 - STRUCTURE DU RÉSEAU:



met en corrélation la vitesse de la ligne de transport en commun avec la vitesse du transport par automobile, ne doivent être spécifiés que lorsqu'ils changent de valeur. Cette donnée est stockée par tronçon de ligne. On admet jusqu'à deux temps de battement par itinéraire de ligne, et ces temps sont spécifiés immédiatement après le noeud où le battement a lieu. Il n'est pas nécessaire qu'une ligne de transport en commun rejoigne son point de départ; c'est le cas de certains services durant l'heure de pointe. Le réseau de base est défini par l'ensemble de tous les noeuds et de tous les liens entre ces noeuds, quel que soit le mode de transport qui les utilise.

L'utilisateur peut spécifier jusqu'à trois éléments de données supplémentaires pour chaque noeud, lien et ligne de transport en commun. Ces données définies par l'utilisateur peuvent inclure, entre autres, les flux observés par lien, les temps de déplacement observés par lien ou toute autre information que le planificateur entend utiliser dans les analyses subséquentes. Elles peuvent également inclure, par exemple, les taux d'accidents à certains noeuds du réseau.

Chaque ensemble de données sur un réseau (modes, réseau de base, véhicules de transport en commun, pénalités des mouvements tournants, lignes de transport en commun) forme un scénario; il en est de même de l'année de référence. L'utilisateur peut établir un nouveau scénario en reproduisant les données d'un scénario existant et en introduisant les modifications appropriées sur l'un ou l'autre groupe de données du réseau. Toutes ces opérations peuvent s'effectuer d'une façon interactive avec, le cas échéant, des données de sortie sous forme graphique. Dans le EMME/2, les données de réseau qui correspondent à une année de référence ne sont pas conceptionnellement différentes des données qui correspondent à la configuration d'une année future.

<u>Les matrices</u>

Les matrices traitées par EMME/2 peuvent être soit pleines, soit des vecteurs par origine ou par destination, soit scalaires. Elles peuvent contenir les diverses données socio-économiques ayant trait à la subdivision

zonale de la région urbaine étudiée, à la demande par origine et destination, aux temps de déplacement par origine et destination et par mode, etc. Une matrice peut être un élément d'entrée ou un élément de sortie d'un traitement informatisé.

L'éditeur de matrice a été conçu d'une façon qui permet à l'utilisateur de choisir la forme matricielle qui se prête le mieux à ses données, afin d'éviter les répétitions inutiles dans la base de données. Par exemple, si une matrice complète a la même valeur dans toutes ses cases, l'utilisateur peut préciser qu'il veut une matrice scalaire et en donner la valeur, suite à quoi l'éditeur de matrice utilisera uniquement l'espace requis pour conserver la matrice scalaire dans la base de données, mais quand on a besoin d'une matrice complète dans un modèle EMME/2, l'éditeur de matrice transforme automatiquement la matrice scalaire en une matrice pleine dont toutes les cases à l'intérieur du module reproduisent, au moment de l'exécution, la même grandeur scalaire. Le même principe s'applique à des valeurs ayant trait aux origines ou aux destinations.

L'éditeur de matrice ne définit aucune matrice par défaut. La définition d'une matrice et de son contenu est laissée à l'utilisateur. De cette façon, si la routine d'affectation prévoit la disponibilité d'une matrice origine-destination, l'utilisateur définit cette matrice et s'assure qu'elle contient les données correctes, ce qui facilite considérablement l'évaluation d'un scénario donné avec différentes matrices O-D.

Les scénarios de réseau créés par l'éditeur de réseau peuvent être utilisés avec n'importe quelle matrice faisant partie de la base de données. L'utilisateur identifie les matrices pertinentes qu'il désire utiliser avec un scénario donné. Par ailleurs, l'éditeur de matrices du EMME/2 contient des procédés d'équilibrage de matrice en deux ou trois dimensions. L'emploi judicieux de ces procédés avec les matrices appropriées permet à l'utilisateur de cadrer les matrices ou de mettre en oeuvre certaines versions des modèles classiques d'interaction spatiale.

Lorsque l'éditeur de matrice prévoit un numéro de zone, on peut spécifier un groupe de zones en indiquant que l'opération s'applique à toutes les zones de ce groupe. Un groupe de zones est une série de zones. Un ensemble de groupes de zones qui comprend toutes les zones est appelé ensemble. Dans un ensemble, une zone peut figurer dans un groupe seulement. L'utilisateur du EMME/2 peut spécifier jusqu'à 25 ensembles contenant chacun jusqu'à 100 groupes de zones. L'avantage de l'utilisation des groupes de zones est qu'elle facilite la sélection efficace des sous-groupes de zones, opération requise dans un grand nombre d'applications.

L'éditeur de matrices comprend un module qui permet à l'utilisateur d'effectuer les calculs matriciels. L'utilisateur précise par une expression algébrique les opérations qu'il veut exécuter. Les éléments de ces expressions algébriques peuvent être choisis parmi les 16 opérations logiques et algébriques et 9 fonctions intrinsèques. Les variables permises dans ces expressions sont les matrices de la base des données du EMME/2, le nombre de centroïdes et les groupes de zones.

<u>Les fonctions</u>

Toutes les fonctions utilisées dans le EMME/2 (fonction volume-délai, fonction de rapport entre le temps de déplacement par véhicule de transport en commun et le temps de déplacement par automobile, fonction des pénalités de mouvement tournant, fonction-demande, etc.) sont spécifiées par l'utilisateur sous forme d'expressions algébriques. Ces fonctions ne font pas partie du code en tant que fonctions définies par l'utilisateur ou sous-programmes, comme dans le système EMME/1 ou les autres systèmes analogues. Lorsqu'un module EMME/2 exige l'utilisation d'une fonction particulière, on évalue la fonction en employant les données appropriées qui correspondent aux variables définies par l'utilisateur dans les expression algébriques qui représentent ces fonctions.

Outre les catégories de fonctions décrites ci-dessous, l'utilisateur peut définir et afficher des fonctions qui ne sont employées dans aucun des calculs standard du système EMME/2.

Méthodes d'affectation

La méthode d'affectation la plus générale fournie par EMME/2 est une méthode d'affectation multimodale avec demande variable, qui calcule les demandes d'équilibre, les flux et les niveaux de service pour tous les modes considérés. Étant donné que les méthodes d'affectation ont une structure modulaire, l'utilisateur peut choisir la répartition en fonction du plus court chemin ou des chemins concurrents sur le réseau desservi par le transport collectif et par l'un ou l'ensemble des modes de transport semi-collectif. Pour la répartition avec demande variable, on peut spécifier simultanément les fonctions de choix modal et les fonctions de demande directe.

Les résultats

EMME/2 permet à l'utilisateur d'obtenir une large gamme de résultats, tant sous forme de graphiques obtenus interactivement que sous forme de rapports. La principale caractéristique des résultats est la comparaison interactive des scénarios en même temps qu'un affichage graphique. Les principaux résultats associés à la comparaison des scénarios concernent les flux par lien, les demandes origine-destination et les niveaux de service, mais on peut obtenir de nombreux autres résultats à l'aide des données définies par l'utilisateur (par exemple, comparaison des flux prévus avec les flux observés, aux fins du calibrage).

Il y a lieu de souligner que, contrairement au traitement par "lots" où chaque exécution réussie se termine par un groupe de résultats particulier, le traitement interactif graphique permet à l'utilisateur d'obtenir des résultats de divers types durant une session particulière du EMME/2. La notion de "résultat" est donc différente de celle ayant trait au traitement par lots et l'on peut dire qu'elle couvre toute la gamme d'affichages, les résultats des méthodes de calcul, les explorations de la base des données et les comparaisons de scénarios.

Lignes de démarcation et "log book"

Pour une région urbaine donnée, l'utilisateur peut définir des lignes de démarcation qui peuvent être superposées sur un graphique de sortie qui couvre la région définie par les subdivisions zonales. La ligne de démarcation peut identifier les caractéristiques géographiques de la région urbaine, comme les rivières ou montagnes, ou délimiter certains quartiers de la ville, comme le centre-ville commercial.

Un "log book" enregistre automatiquement l'identité de l'utilisateur et les modules et éléments de la base de données utilisés durant toutes les sessions du EMME/2.

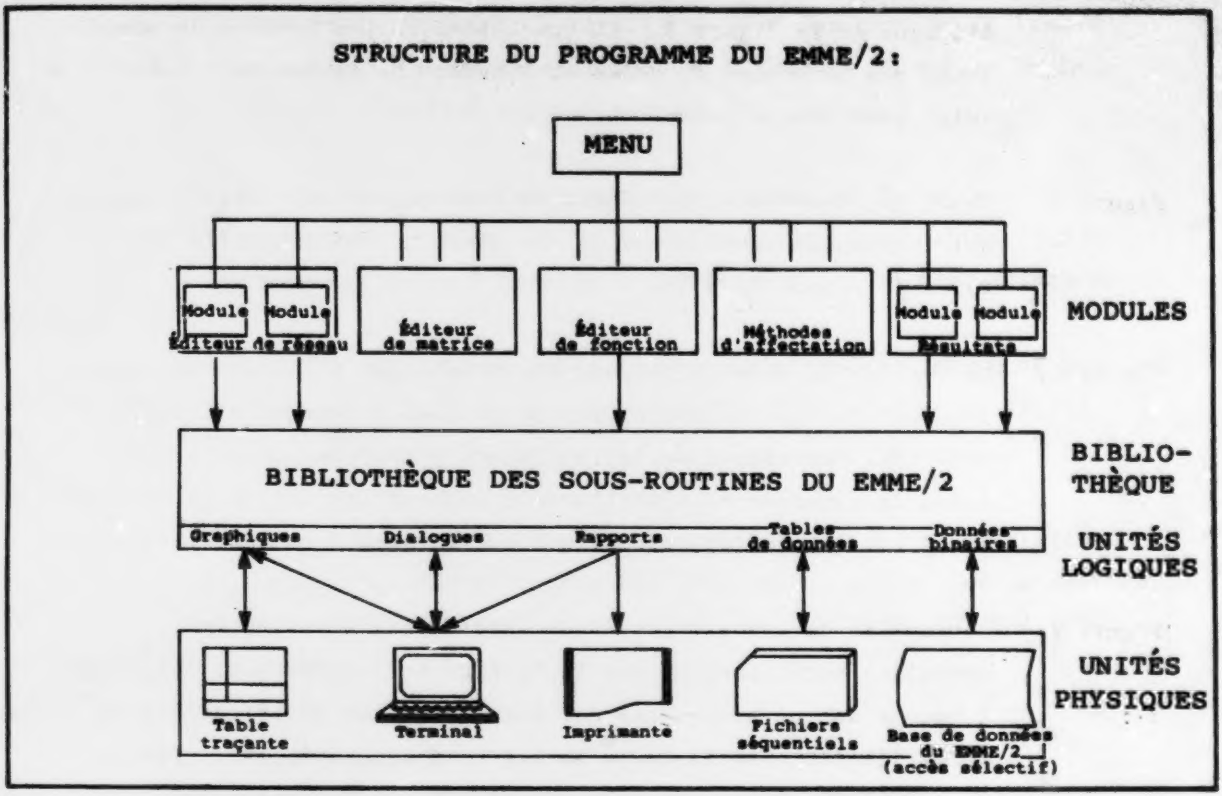
EMME/2 - LE SYSTÈME INFORMATISÉ

Le EMME/2 a été codifié en utilisant le language Fortran IV ANSI. Il est conçu d'une façon qui facilite son adaptabilité à divers modèles d'ordinateurs. Bien qu'il fût élaboré sur le Cyber 173 de l'Université de Montréal, il peut être adapté facilement à d'autres ordinateurs, y compris une certaine catégorie de mini (micro)-ordinateurs.

Le code du EMME/2 a une structure modulaire. Chaque module est un programme indépendant, mais tous les modules partagent la bibliothèque des sous-programmes. Tous les transferts de données entre les modules ne se produisent que par l'intermédiaire de la base de données. Le diagramme 3 schématise la structure du programme.

À présent, le EMME/2 est mis en oeuvre en vue de son utilisation sur n'importe quel terminal Tektronix 4010 et 4110. Tout résultat affiché sur l'écran peut être copié à l'aide de l'imprimante des documents en clair Tektronix 4631. Le même résultat peut être reproduit sous la forme d'un graphique de haute qualité technique, à l'aide de la table traçante Tektronix 4663. Le EMME/2 peut être facilement adapté à un autre matériel graphique à résolution comparable.

Diagramme 3



EXEMPLES DE RÉSULTATS OBTENUS PAR EMME/2

Les figures contenues dans la présente section du rapport sont un échantillon des résultats qu'on peut obtenir du système EMME/2.

Figure 1: Liste des modules disponibles du EMME/2.

Figure 2: Tracé d'un réseau de base multimodal. On distingue trois modes: C (automobile), B (autobus) et A (accès). Le centre-ville commercial n'est pas précisé et deux rivières servent de lignes de démarcation.

Figure 3: Exemple de dialogue servant à tracer une fenêtre du réseau de base.

Figure 4: La fenêtre du réseau de base qui est tracée en résultat du dialogue de la figure 3. Le tracé indique les numéros de noeud ainsi que le nombre de voies et l'indice de la fonction volume-délai pour chaque lien.

Figure 5: Tracé du sous-réseau du réseau de base multimodal (figure 2), qui correspond au district 3. Le district est identifié par les types de réseau 32 à 39.

Figure 6: La feuille de travail graphique utilisée par l'éditeur de réseau interactif. La fenêtre du réseau de base qui va être éditée est affichée. Au sommet de la feuille de travail se trouvent les cases de commande où l'utilisateur indique les tables de données à modifier et les opérations qui serviront aux modifications.

Figure 7: La feuille de travail graphique après l'introduction de certaines modifications sur la fenêtre de la figure 6. La marge à gauche est un bloc-notes qui enregistre les modifications et permet de faire un dialogue abrégé pour les additions. Par exemple, on a d'abord inscrit les données du réseau (1020,1018) puis on a éliminé les réseaux (1020,1018) et (1018,1016), puis on a ajouté le noeud 2000, etc.

Figure 8: Tracé du plus court chemin entre deux noeuds sur le réseau de base. Les deux modes sont identifiés interactivement en utilisant les curseurs. La marge de droite contient les indications "du noeud..." "au noeud..." et la distance en unités de longueur. Le plus court chemin est représenté par une ligne foncée sur le réseau de base.

Figure 9: Tracé de la ligne de transport en commun n° 3 sur une fenêtre du réseau de base, qui montre uniquement les liens utilisés par le mode B (autobus).

Figure 10: Tracé de toutes les lignes de transport en commun qui desservent le district n° 3.

Figure 11: Tracé des mouvements tournants à un choix de carrefours. Les mouvements tournants interdits ne sont pas montrés et les mouvements tournants pénalisés sont indexés du numéro de la fonction-pénalité correspondante.

Figure 12: Tracés des productions (totaux de ligne) et des attractions (totaux de colonne) de la matrice origine-destination. La marge de droite donne l'échelle utilisée pour les barres affichées.

Figure 13: Tracé d'une colonne de la matrice origine-destination ou les "lignes de change" pour le centroïde 4. La marge de droite donne l'échelle utilisée pour les barres affichées.

Figure 14: Tracé de quatre fonctions volume/délai. La marge de droite indique les fonctions tracées (FD1, FD2, ...) et les paramètres qui étaient fixés à certaines valeurs (VOLTR=0, VOIES=2, LONGUEUR=.5).

Figure 15: Tracé d'un arbre de plus court chemin sur le réseau d'automobiles (y compris les mouvements tournants pénalisés), en fonction des temps de parcours d'un réseau qui résultent d'une affectation. La marge de droite indique la racine de l'arbre, le centroïde 14.

Figure 16: Comparaison de deux histogrammes de distribution du temps de déplacement. L'année de base correspond à la matrice du temps de déplacement TRTIMO et à la matrice de la demande GPQTRO, tandis que le scénario futur correspond à la matrice du temps de déplacement TRTIMI et à la matrice de la demande GPQTRI. La marge de droite indique à la fois la moyenne et l'écart type de chaque distribution.

Figure 17: Tracé des volumes de trafic par lien (automobile) qui résultent d'une affectation sur le réseau des automobiles. La marge de droite indique que les volumes inférieurs à 100 ne sont pas tracés (SEUIL: INFÉRIEUR: 100) et l'échelle utilisée pour la largeur des barres affichées.

Figure 18: Tracé des vitesses par lien (automobile) par suite d'une affectation sur le réseau des automobiles.

Figure 19: Tracé des volumes du trafic du transport en commun sur la ligne numéro 41, par suite d'une affectation sur le réseau du transport en commun.

Figure 1

1. P R O G R A M M E   U T I L I T A I R E

1.11 MANIPULATION DIRECTE DE LA BASE DES DONNÉES
1.21 CONSULTER LE "LOG BOOK"
1.22 EXPLORER SCÉNARIO
1.23 MODIFIER TITRES ET UNITÉS
1.31 GESTION DU FICHIER E/S
1.41 INTRODUIRE/MODIFIER/AFFICHER LIGNES DE DÉMARCATION

2. É D I T E U R   D E   R É S E A U

2.01 INTRODUIRE/MODIFIER/ÉDITER MODES
2.02 INTRODUIRE/MODIFIER/ÉDITER VÉHICULES TC
2.11 INTRODUIRE RÉSEAU DE BASE À L'AIDE DE TRAITEMENTS EN LOTS
2.12 INTRODUIRE/MODIFIER INTERACTIVEMENT RÉSEAU DE BASE
2.21 INTRODUIRE LIGNES TC À L'AIDE DE TRAITEMENTS EN LOTS
2.22 INTRODUIRE/MODIFIER LIGNES TC INTERACTIVEMENT
2.23 TRACER LIGNES TC
2.24 ÉDITER LIGNES TC
2.31 INTRODUIRE/MODIFIER/AFFICHER PÉNALITÉ POUR MOUVEMENTS TOURNANTS
2.41 INTRODUIRE/MODIFIER/AFFICHER DONNÉES DÉFINIES PAR L'UTILISATEUR

3. É D I T E U R   D E   M A T R I C E S

3.01 INTRODUIRE/MODIFIER/AFFICHER GROUPES DE ZONES
3.11 INTRODUIRE LES MATRICES À L'AIDE DE TRAITEMENTS EN LOTS
3.12 INTRODUIRE/MODIFIER INTERACTIVEMENT LES MATRICES
3.13 TRACER LES MATRICES
3.14 SORTIR LES MATRICES
3.15 COMPARER LES MATRICES
3.16 TRACER L'HISTOGRAMME DES MATRICES
3.21 CALCULER ET BALANCER LES MATRICES

4. É D I T E U R   D E   F O N C T I O N

4.11 INTRODUIRE LES FONCTIONS À L'AIDE DE TRAITEMENTS EN LOTS
4.12 INTRODUIRE/MODIFIER LES FONCTIONS INTERACTIVEMENT
4.13 TRACER LES FONCTIONS
4.14 ÉDITER LES FONCTIONS

5. M É T H O D E S   D' A F F E C T A T I O N

5.11 PRÉPARER LE SCÉNARIO D'AFFECTATION
5.21 AFFECTATION DES AUTOMOBILES
5.31 AFFECTATION DES VÉHICULES TC
5.41 AFFECTATION BIMODALE

6. R É S U L T A T S

6.01 SOMMAIRE DES RÉSULTATS
6.11 LISTER TEMPS ET VOLUMES AUTO
6.12 TRACER TEMPS ET VOLUMES AUTO
6.13 COMPARER TEMPS ET VOLUMES AUTO
6.14 TRACER TEMPS ET VOLUMES AUTO SUR CARREFOURS
6.15 TRACER LES PLUS COURTS CHEMINS SUR RÉSEAU D'AUTOMOBILES
6.21 LISTER VOLUMES TC
6.22 TRACER VOLUMES TC
6.23 COMPARER VOLUMES TC
6.31 LISTER RÉPARTITION DU TRAFIC
6.32 TRACER RÉPARTITION DU TRAFIC
6.33 COMPARER RÉPARTITION DU TRAFIC

Figure 2

(1) RÉSEAU DE BASE

(2) MODES:

TYPES DE LIENS:
λ

(3) FENÊTRE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 2

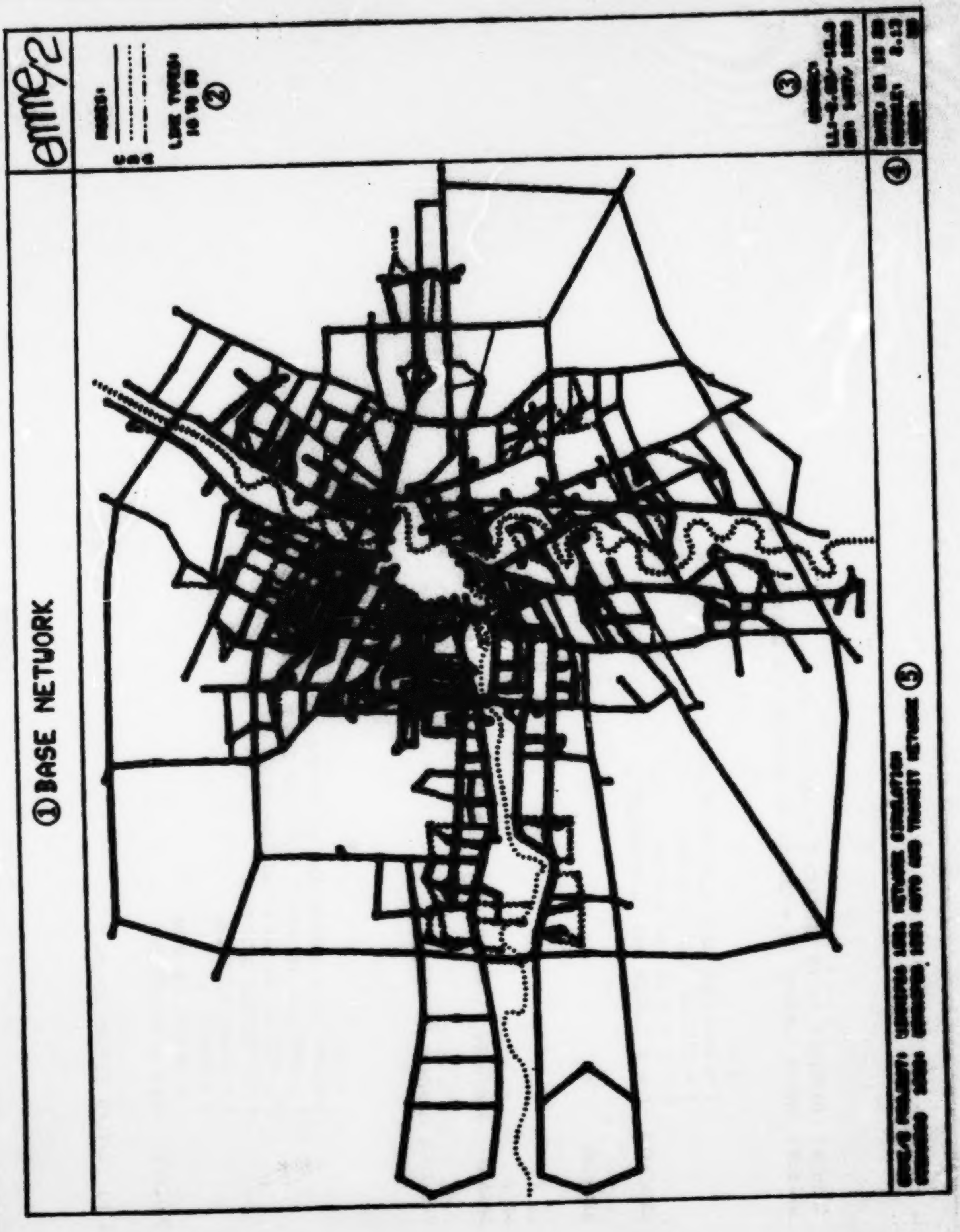


Figure 3

```
2.13  TRACER RÉSEAU DE BASE

CHOISIR:  TYPE D'AFFICHAGE
          1 = RÉSEAU DE BASE
          2 = MODES
          3 = TYPES DE LIENS
          4 = LONGUEUR DE LIENS
          5 = FONCTIONS VOIES/VOLUME-DÉLAI
          6 = DONNÉES DE RÉSEAU DÉFINIES PAR L'UTILISATEUR
          7 = MODIFIER PARAMÈTRES DU MODULE
          8 = FIN
            5

AFFICHER NUMÉROS DE NOEUDS

ENTRER:  TYPES DE LIENS DÉSIRÉS (DE, À)
=1,6
=/

FENÊTRE

CHOISIR:  1 = À L'AIDE DES COORDONNÉES
          2 = À L'AIDE DES NOEUDS
          3 = CENTRÉE SUR UN NOEUD
          4 = UTILISER MÊME FENÊTRE QU'AVANT
            3

ENTRER:  NOEUD CENTRAL (0 = CENTRE DE FENÊTRE PAR DÉFAUT) = 947
ENTRER:  DIAMÈTRE DE LA FENÊTRE (   192.2) = 25
```

Figure 4

(1) RÉSEAU DE BASE
NOMBRE DE VOIES/FONCTION VOLUME-DÉLAI

(2) MODES:

TYPES DE LIENS:
À

(3) FENÊTRE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 4

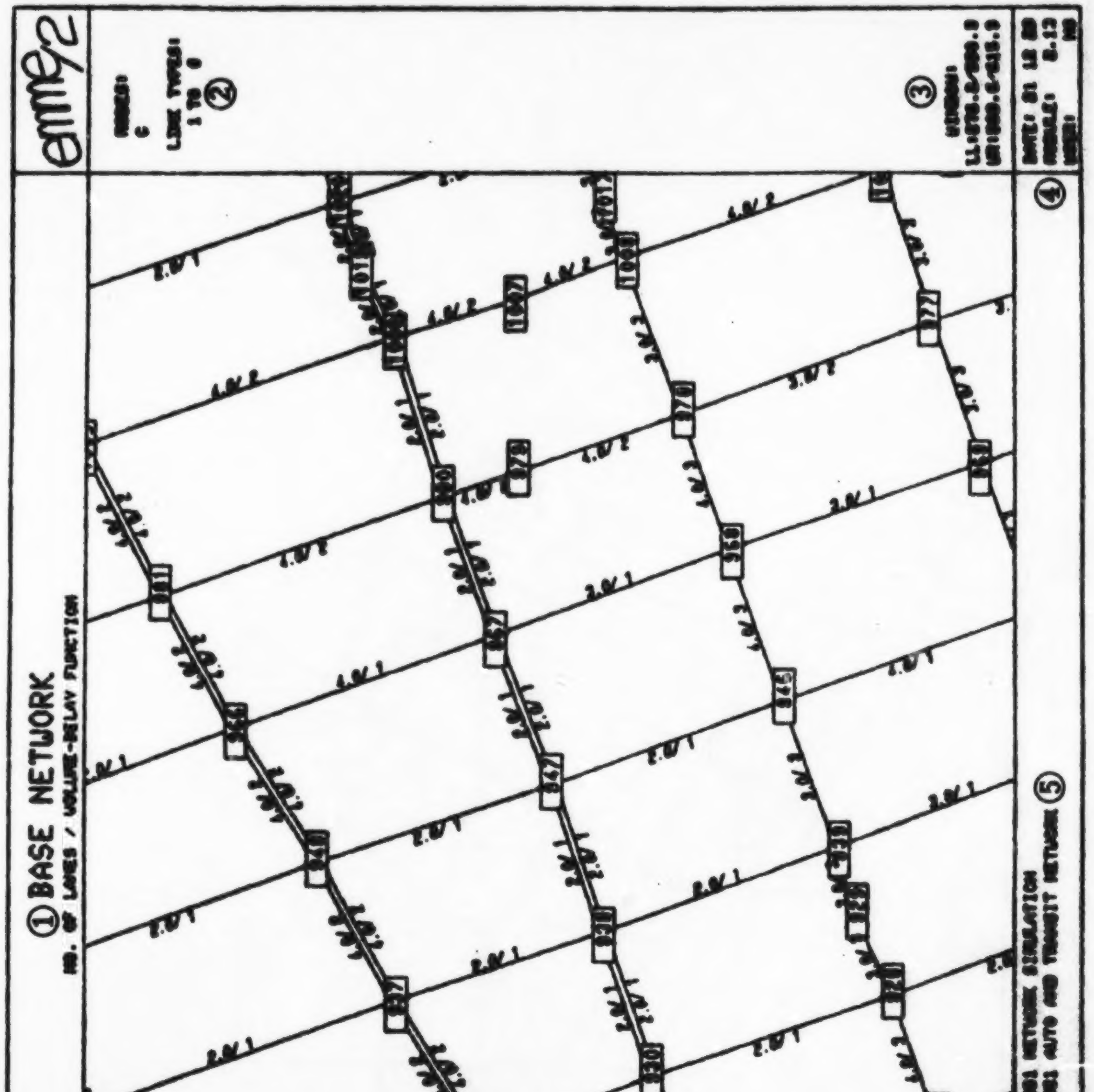


Figure 5

(1) RÉSEAU DE BASE

(2) MODES:

TYPES DE LIENS:
À

(3) FENÊTRE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: BASE DE DONNÉES D'ESSAI (164 CENTROÏDES, 1 200 NOEUDS, 3 000 LIENS, 100 LIGNES, 5 000 TRONÇONS)

SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 5

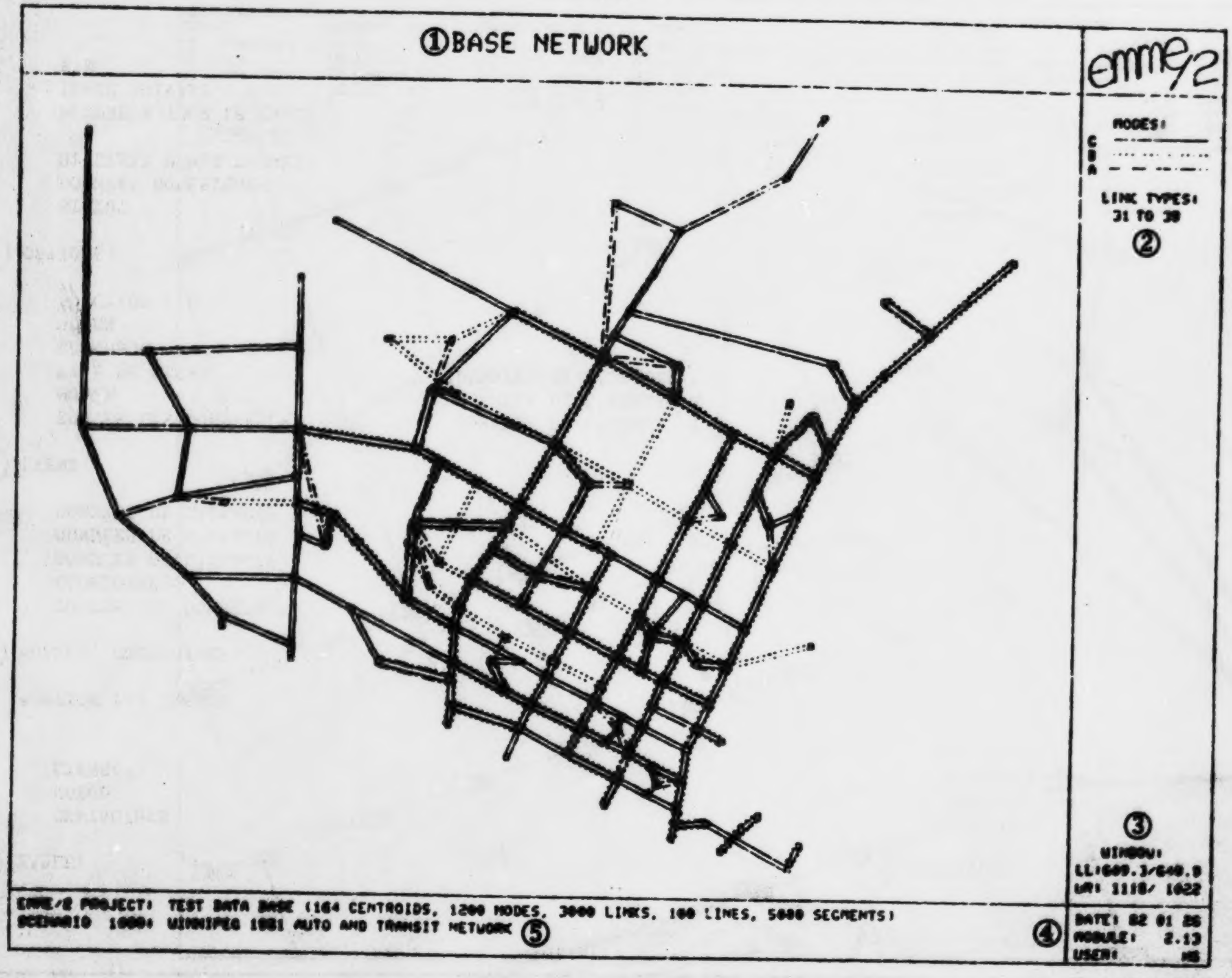

①BASE NETWORK
emme/2
MODES:
C
B
A
LINK TYPES:
31 TO 39
②
③
WINDOW:
LL:609.3/640.9
UR: 1118/ 1022
④
DATE: 82 01 26
MODULE: 2.13
USER:
EMME/2 PROJECT: TEST DATA BASE (164 CENTROIDS, 1200 NODES, 3000 LINKS, 100 LINES, 5000 SEGMENTS)
SCENARIO 1000: WINNIPEG 1981 AUTO AND TRANSIT NETWORK ⑤

Figure 6

(1) TABLE:

CENTROÏDES
NOEUDS
LIENS(*)

*OPTION PAR DÉFAUT

(2) OPÉRATION:

AJOUTER
ANNULER
MODIFIER
LISTER(*)

(3) NOEUDS, CENTROÏDES:

TOUTES LES DONNÉES(*)
COORDONNÉES
DONNÉES DE L'USAGER 1
DONNÉES DE L'USAGER 2
DONNÉES DE L'USAGER 3

(4) LIENS:

TOUTES LES DONNÉES(*)
MODES
TYPE DE LIENS
LONGUEUR
VOIES
FONCTION V/D
DONNÉES DE L'USAGER 1
DONNÉES DE L'USAGER 2
DONNÉES DE L'USAGER 3

(5) OPTIONS:

STATUT
DONNÉES NUMÉRIQUES
UTILISER MÊMES DONNÉES

METTRE À JOUR LE TRACÉ
TRACÉ SUIVANT
FIN

(6) EMME/2
DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:
SCÉNARIO:

Figure 6

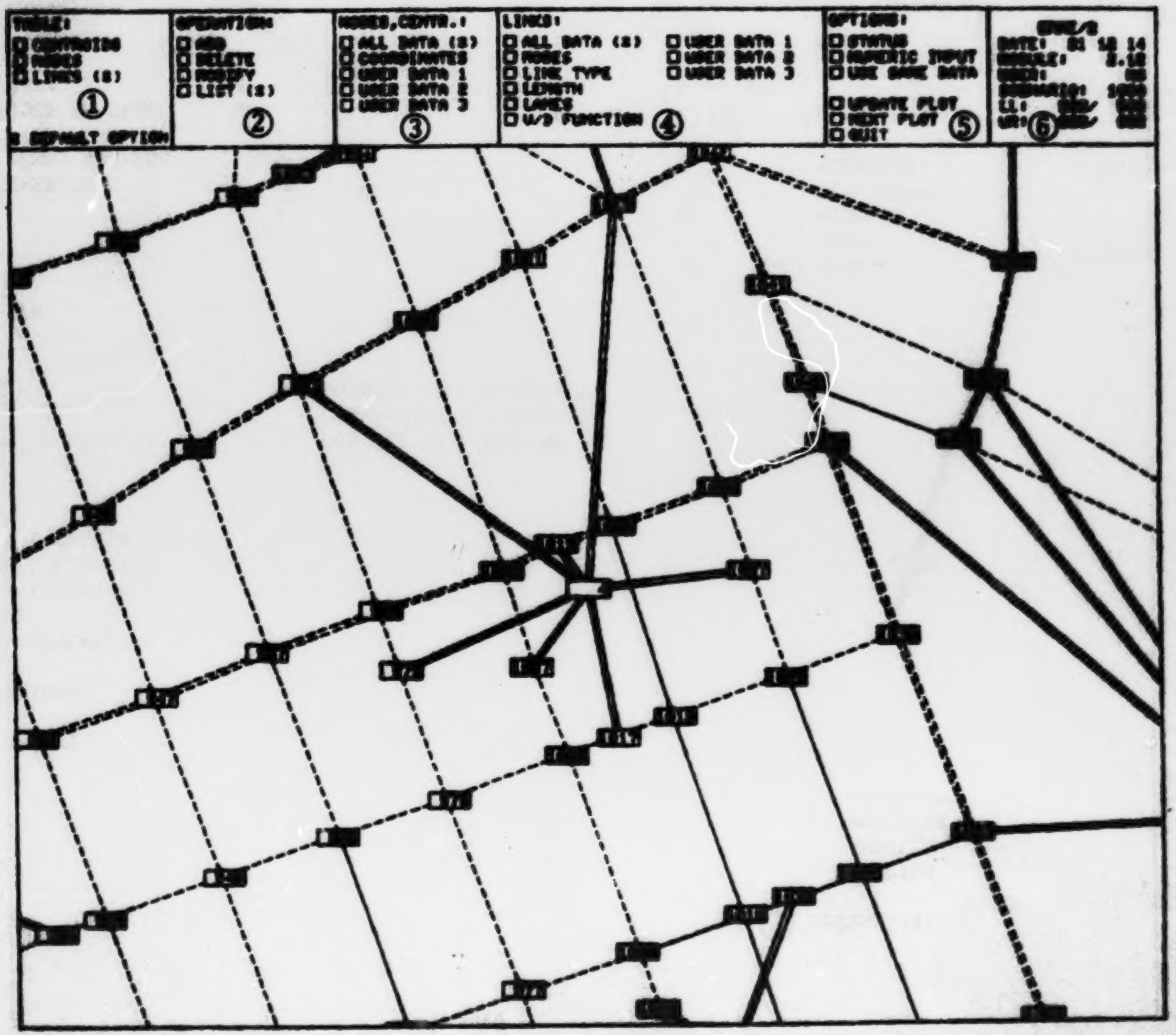


TABLE:
CENTROIDS
NODES
LINKS (S)
①
DEFAULT OPTION
OPERATION:
ADD
DELETE
MODIFY
LIST (S)
②
NODES,CENTR.:
ALL DATA (S)
COORDINATES
USER DATA 1
USER DATA 2
USER DATA 3
③
LINKS:
ALL DATA (S)
NODES
LINK TYPE
LENGTH
LANES
V/D FUNCTION
④
USER DATA 1
USER DATA 2
USER DATA 3
OPTIONS:
STATUS
NUMERIC INPUT
USE SAME DATA
UPDATE PLOT
NEXT PLOT
QUIT
⑤
⑥

Figure 7

(1) TABLE:

CENTROÏDES
NOEUDS
LIENS(*)

*OPTION PAR DÉFAUT

(2) OPÉRATION:

AJOUTER
ANNULER
MODIFIER
LISTER(*)

(3) NOEUDS, CENTROÏDES:

TOUTES LES DONNÉES(*)
COORDONNÉES
DONNÉES DE L'USAGER 1
DONNÉES DE L'USAGER 2
DONNÉES DE L'USAGER 3

(4) LIENS:

TOUTES LES DONNÉES(*)
MODES
TYPE DE LIENS
LONGUEUR
VOIES
FONCTION V/D
DONNÉES DE L'USAGER 1
DONNÉES DE L'USAGER 2
DONNÉES DE L'USAGER 3

(5) OPTIONS:

STATUT
DONNÉES NUMÉRIQUES
UTILISER MÊMES DONNÉES

METTRE À JOUR LE TRACÉ
TRACÉ SUIVANT
FIN

(6) EMME/2
DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:
SCÉNARIO:

Figure 7

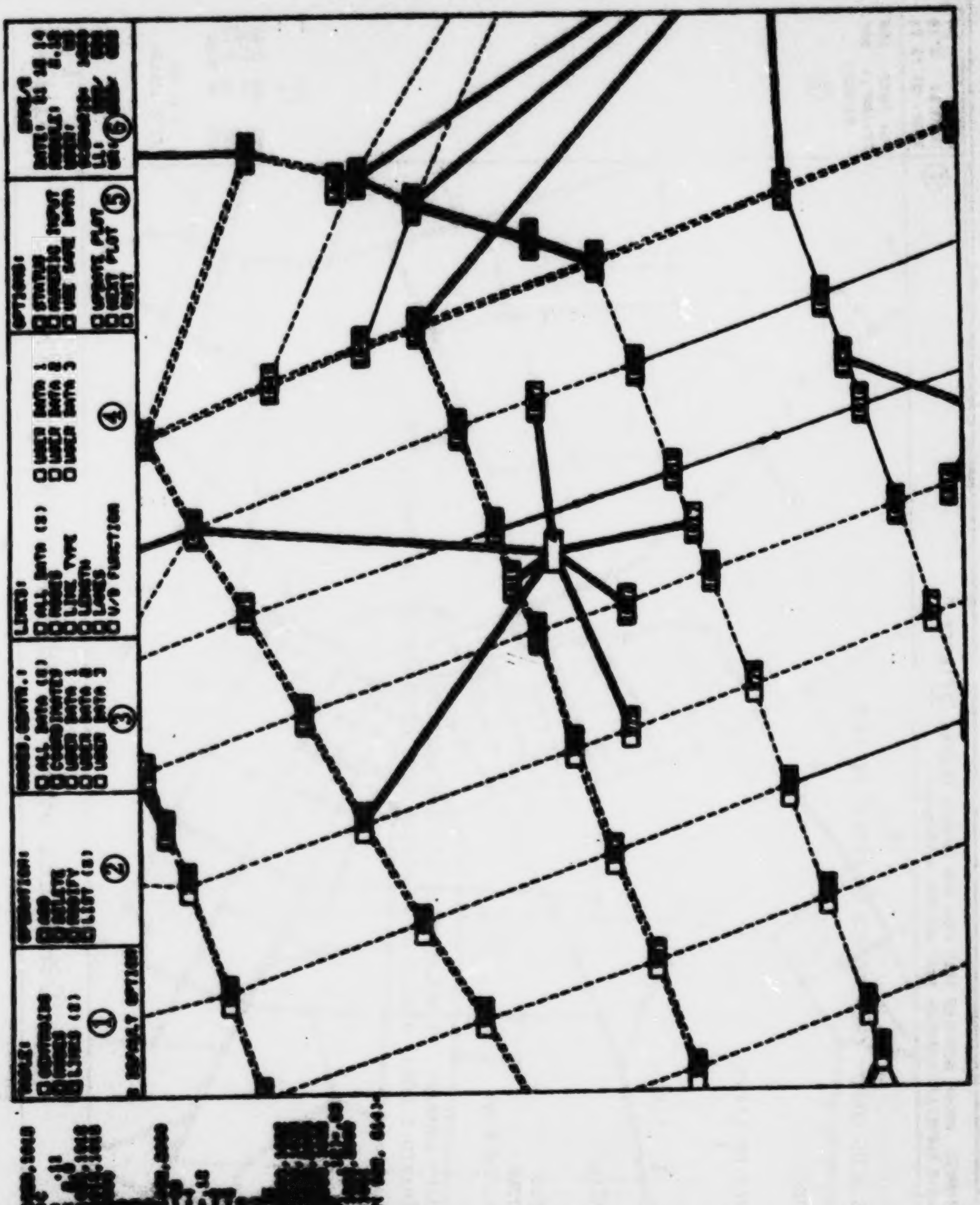


Figure 8

(1) LES PLUS COURTS CHEMINS SUR LE RÉSEAU DE BASE

(2) MODES:

TYPES DE LIENS:
À

DE À DIST.

(3) FENÊTRE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 8

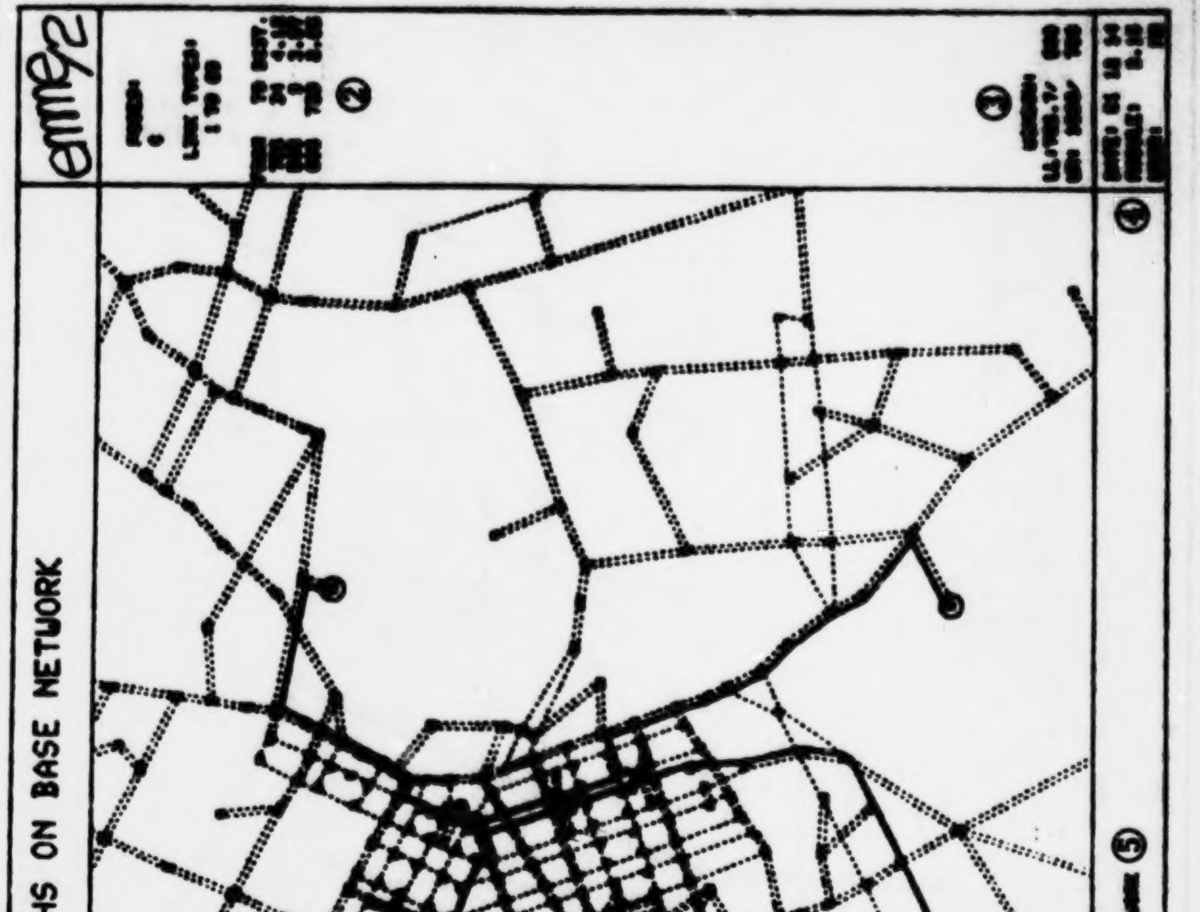


Figure 9

① LIGNES DE TRANSPORT EN COMMUN

② TYPES DE LIENS:
À

MODES:

LIGNES TC:

③ FENÊTRE:

④ DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

⑤ PROJET EMME/2: BASE DE DONNÉES D'ESSAI (164 CENTROÏDES, 1 200 NOEUDS, 3 000 LIENS, 100 LIGNES, 5 000 TRONÇONS)
SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 9

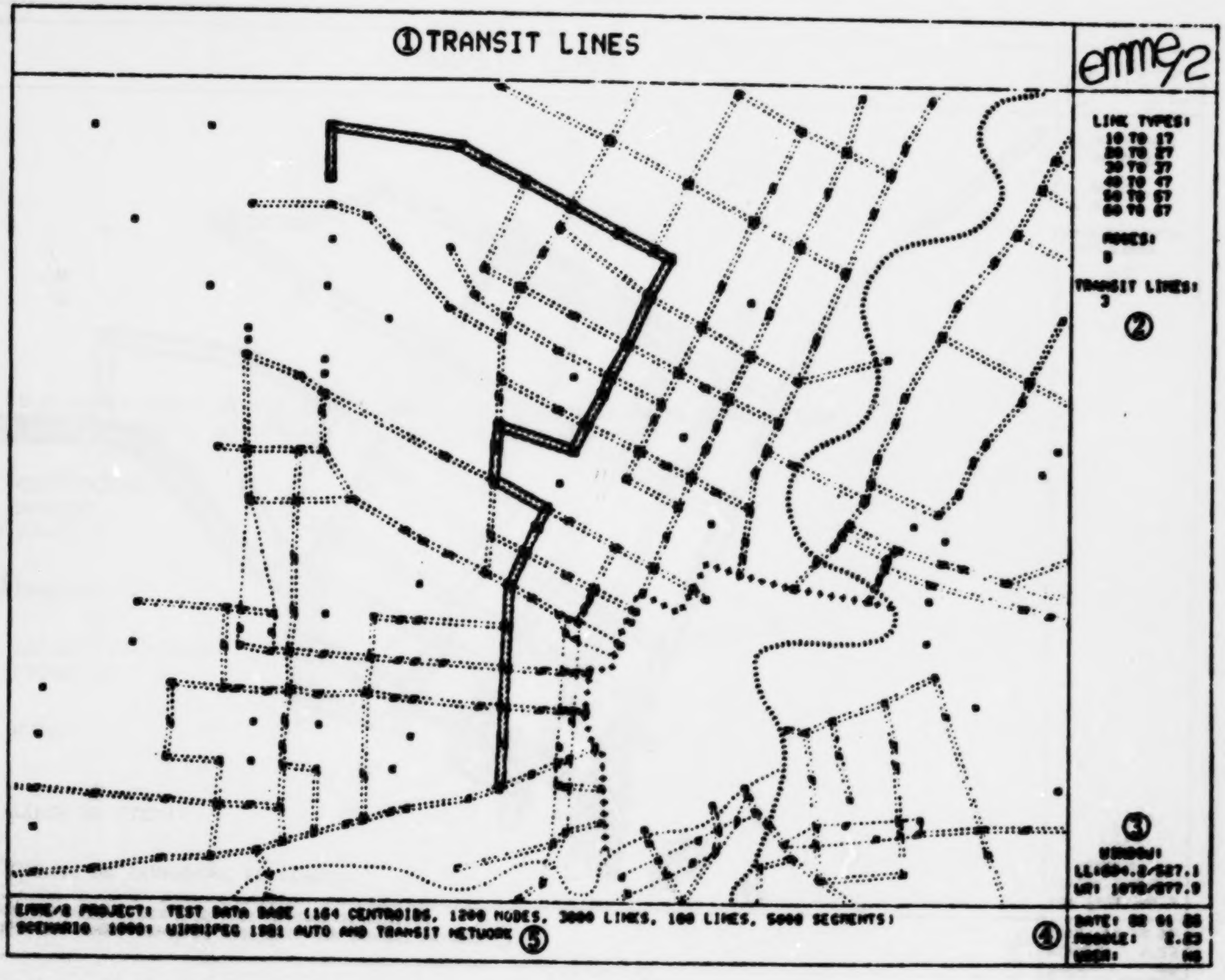

①TRANSIT LINES
emme/2
LINK TYPES:
10 TO 17
TRANSIT LINES:
3
②
③
④
TEST DATA BASE (164 CENTROIDS, 1200 NODES, 3000 LINKS, 100 LINES, 5000 SEGMENTS)
WINNIPEG 1981 AUTO AND TRANSIT NETWORK ⑤

Figure 10

(1) LIGNES DE TRANSPORT EN COMMUN

(2) TYPES DE LIENS:
À

MODES:

LIGNES TC:
TOUTES LES LIGNES

(3) FENÊTRE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 10

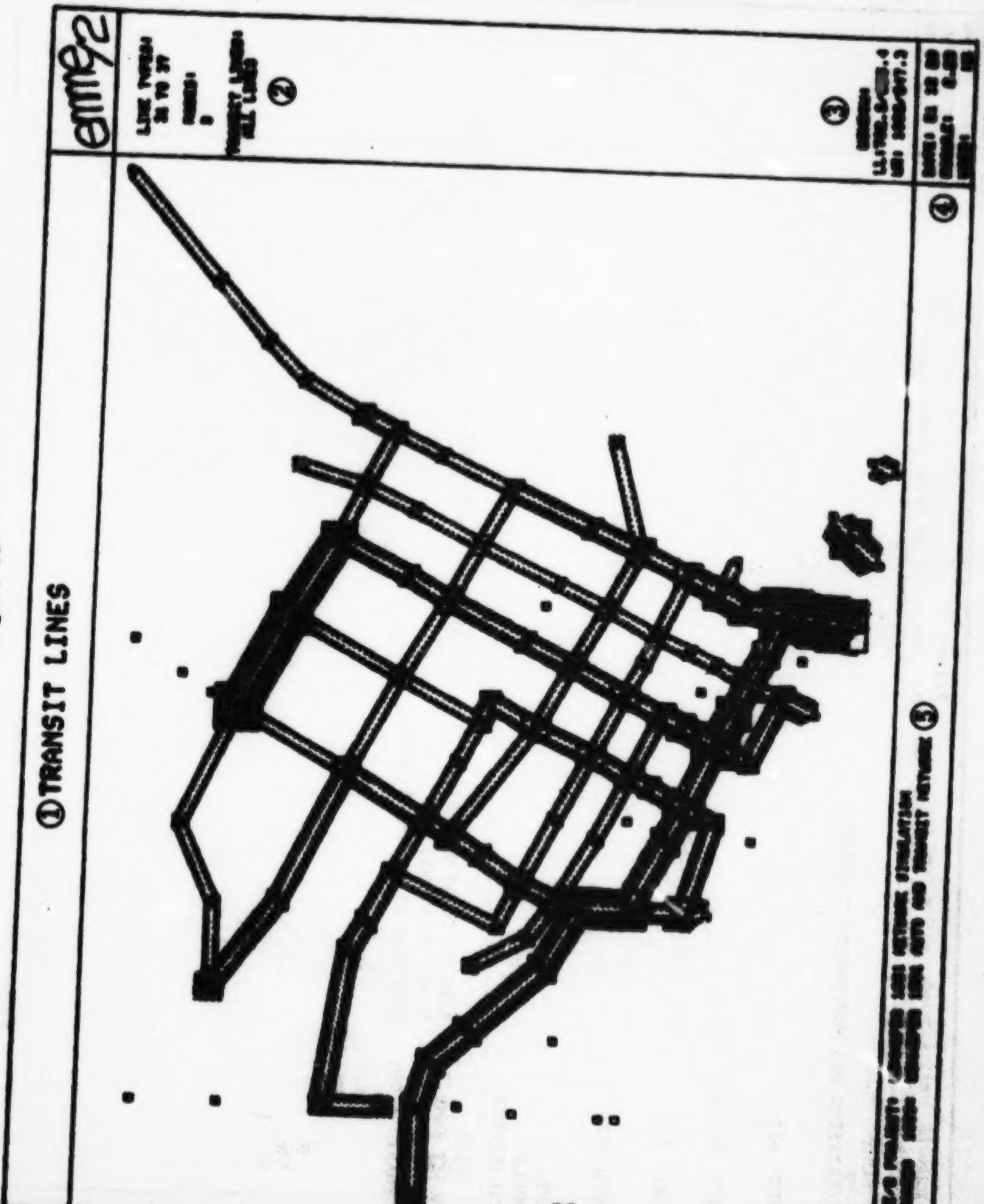


Figure 11

(1) PÉNALISATION DES MOUVEMENTS TOURNANTS

(2) NOEUD 415

(3) NOEUD 423

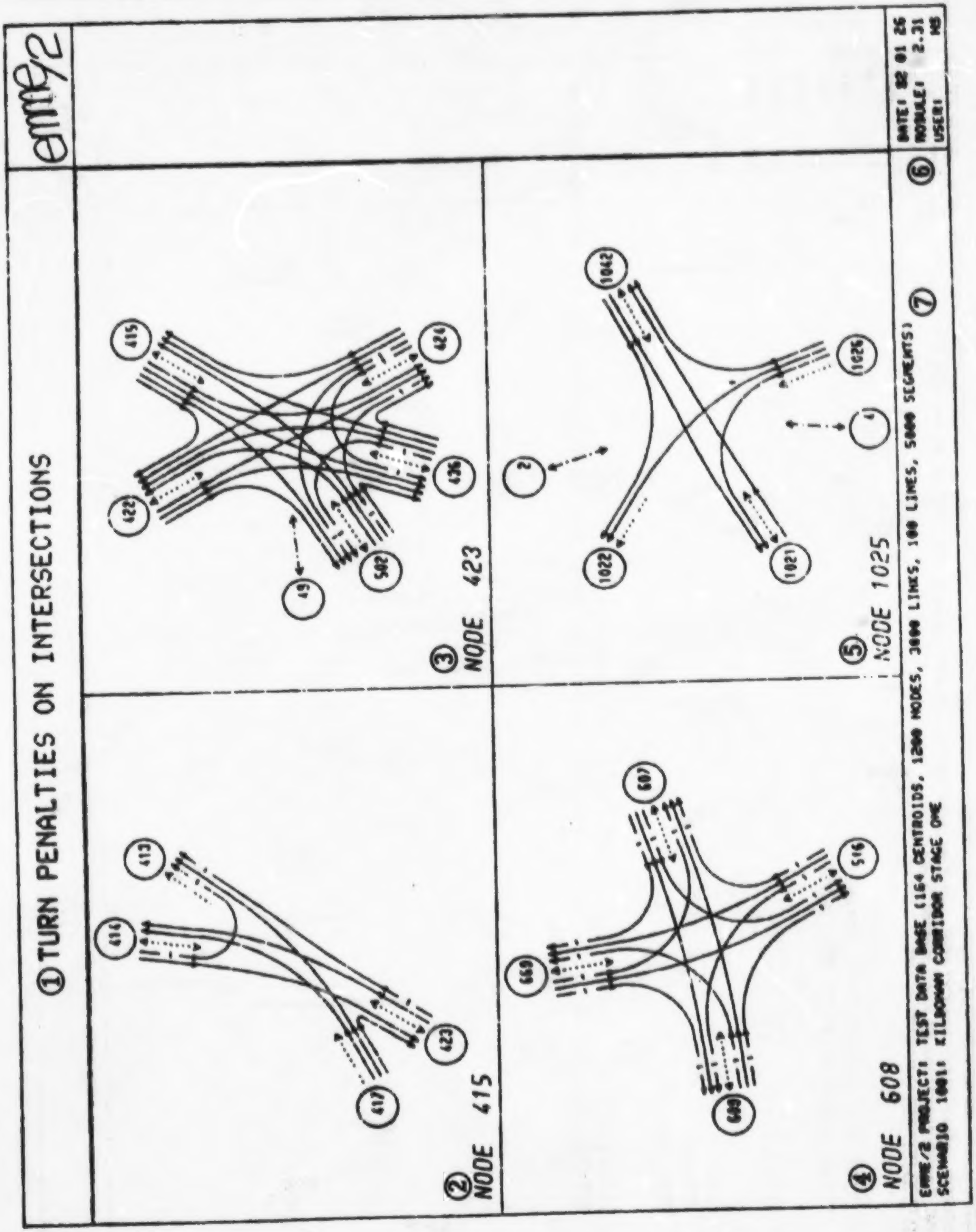
(4) NOEUD 608

(5) NOEUD 1025

(6) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(7) PROJET EMME/2: BASE DE DONNÉES D'ESSAI (164 CENTROÏDES, 1 200 NOEUDS, 3 000 LIENS, 100 LIGNES, 5 000 TRONÇONS)
SCÉNARIO 1 001: CORRIDOR KILDONAM, ÉTAPE 1

Figure 11



emme/2
TURN PENALTIES ON INTERSECTIONS
NODE 415
NODE 423
NODE 608
NODE 1025
EMME/2 PROJECT: TEST DATA BASE (1164 CENTROIDS, 1200 NODES, 3000 LINKS, 100 LINES, 5000 SEGMENTS)
SCENARIO 1001: KILDONAN CORRIDOR STAGE ONE
DATE: 82 01 25
MODULE: 2.31
USER: MS

Figure 12

(1) TRACÉ DE LA MATRICE   WOD76D
TOTAL PAR ORIGINE ET DESTINATION

(2) ÉCHELLE:

(3) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(4) PROJET EMME/2:   SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNATIO 1 000:   COMPILATEUR DE FONCTION (RÉSEAU DE BASE, LIGNES TC, PÉNALISATIONS DES MOUVEMENTS TOURNANTS ...) 81 02 04)

Figure 12

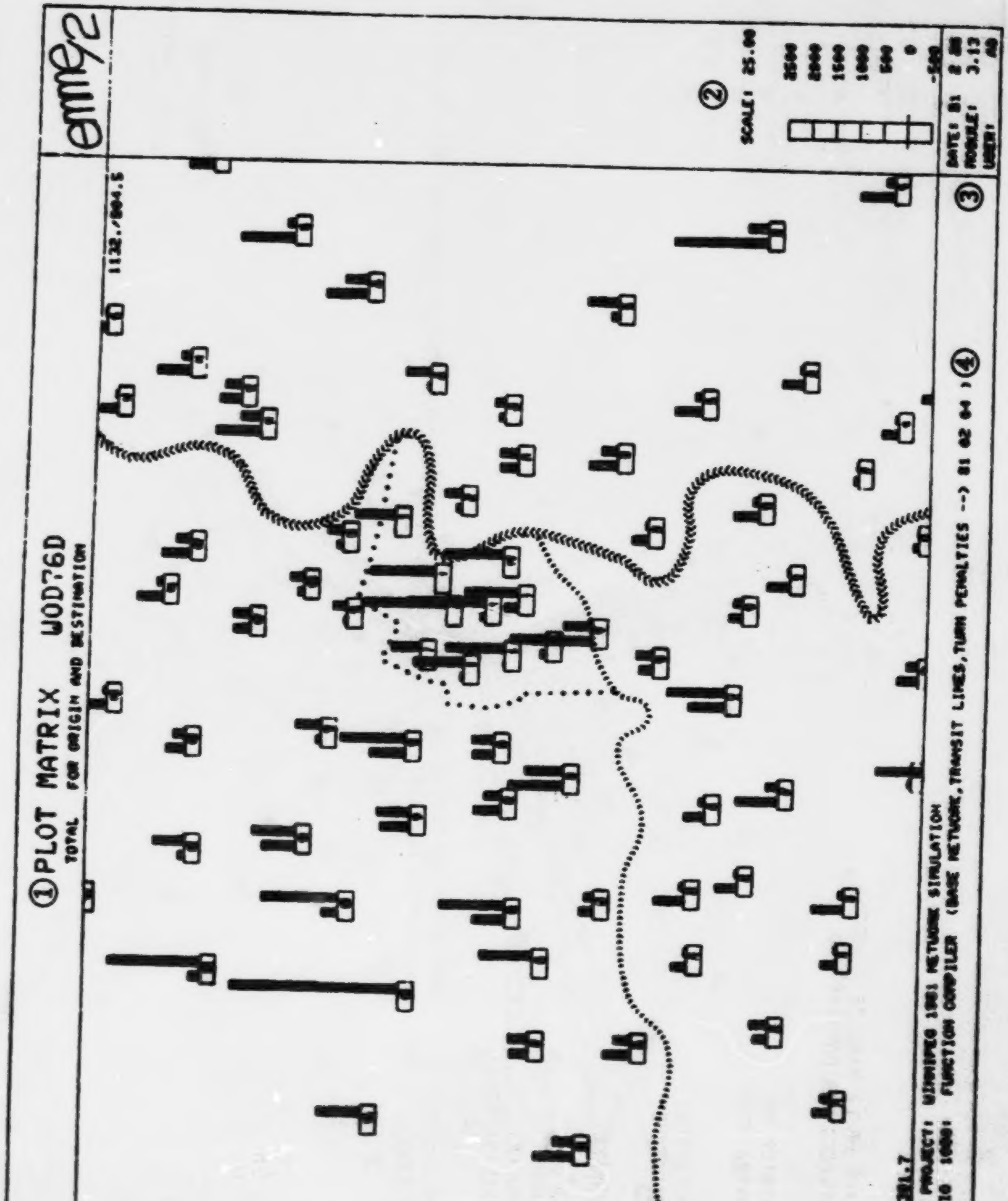

PLOT MATRIX WOD76D
TOTAL FOR ORIGIN AND DESTINATION
SCALE: 25.00
EMME/2 PROJECT: WINNIPEG 1981 NETWORK SIMULATION
SCENARIO 1000: FUNCTION COMPILER (BASE NETWORK, TRANSIT LINES, TURN PENALTIES --> 81 02 04)

Figure 13

(1) TRACÉ DE LA MATRICE WOD76D
MATRICES PAR COUPLES O-D

(2) MATRICE DE
CONTRAINTE:

INFÉRIEUR:
SUPÉRIEUR:

(3) ÉCHELLE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNARIO 1 000: COMPILATEUR DE FONCTION (RÉSEAU DE BASE, LIGNES TC, PÉNALISATIONS DES MOUVEMENTS TOURNANTS ...) 81 02 04)

Figure 13

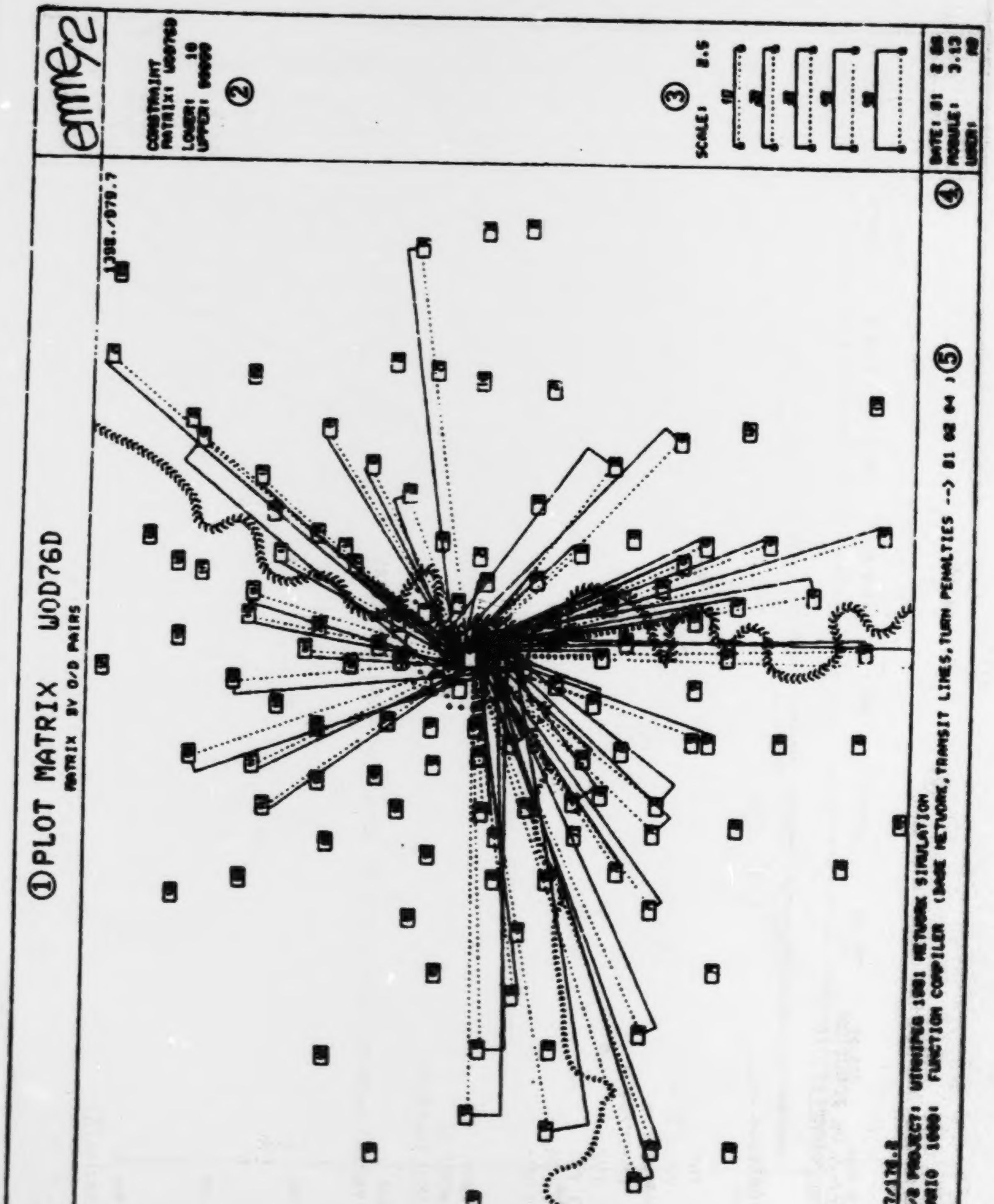


Figure 14

(1) **TRACÉ DE FONCTION**
VOLUME-DÉLAI, AUTO

(2) **FONCTION**

(3) **1 FD1**
VOL. TC =
VOIES =
LONGUEUR =
2 FD2
3 FD3
4 FD4
5 FD5

(4) **DATE:**
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) **PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981**

Figure 14

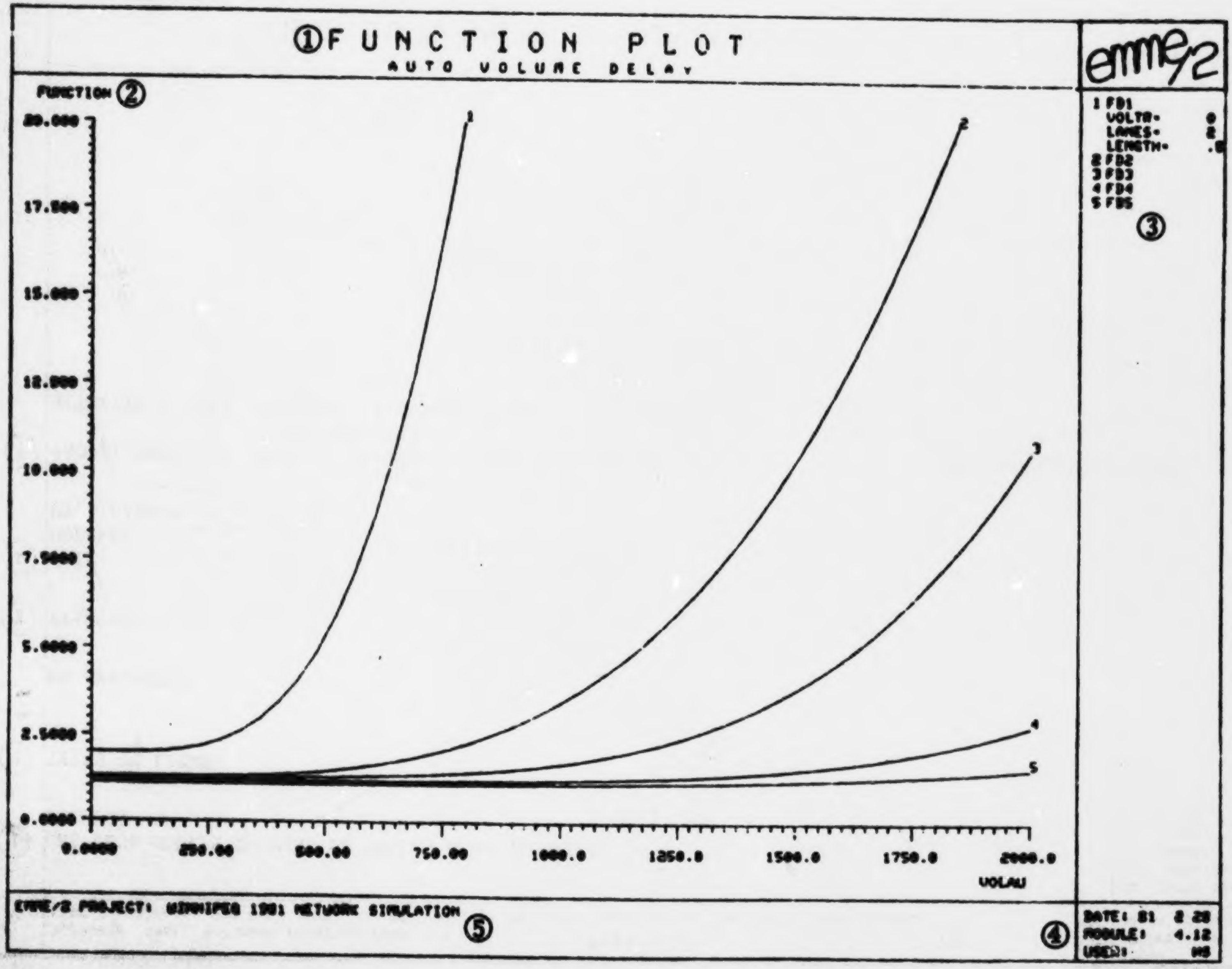

①FUNCTION PLOT
AUTO VOLUME DELAY
FUNCTION ②
20.000
17.500
15.000
12.500
10.000
7.5000
5.0000
2.5000
0.0000
0.0000
250.00
500.00
750.00
1000.0
1250.0
1500.0
1750.0
2000.0
VOLAU
1 FD1
VOLTR= 0
LANES= 2
LENGTH= .5
2 FD2
3 FD3
4 FD4
5 FD5
③
EMME/2 PROJECT: WINNIPEG 1981 NETWORK SIMULATION ⑤
④
DATE: 81 2 28
MODULE: 4.12
USER: MS

Figure 15

(1) LES PLUS COURTS CHEMINS DU RÉSEAU D'AUTOMOBILES
(TEMPS)

(2) TYPES DE LIENS:
À

DU CENTROÏDE

(3) FENÊTRE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: BASE DE DONNÉES D'ESSAI (164 CENTROÏDES, 1 200 NOEUDS, 3 000 LIENS, 100 LIGNES, 5 000 TRONÇONS)
SCÉNARIO 1 001: CORRIDOR KILDONAM, ÉTAPE 1

Figure 15

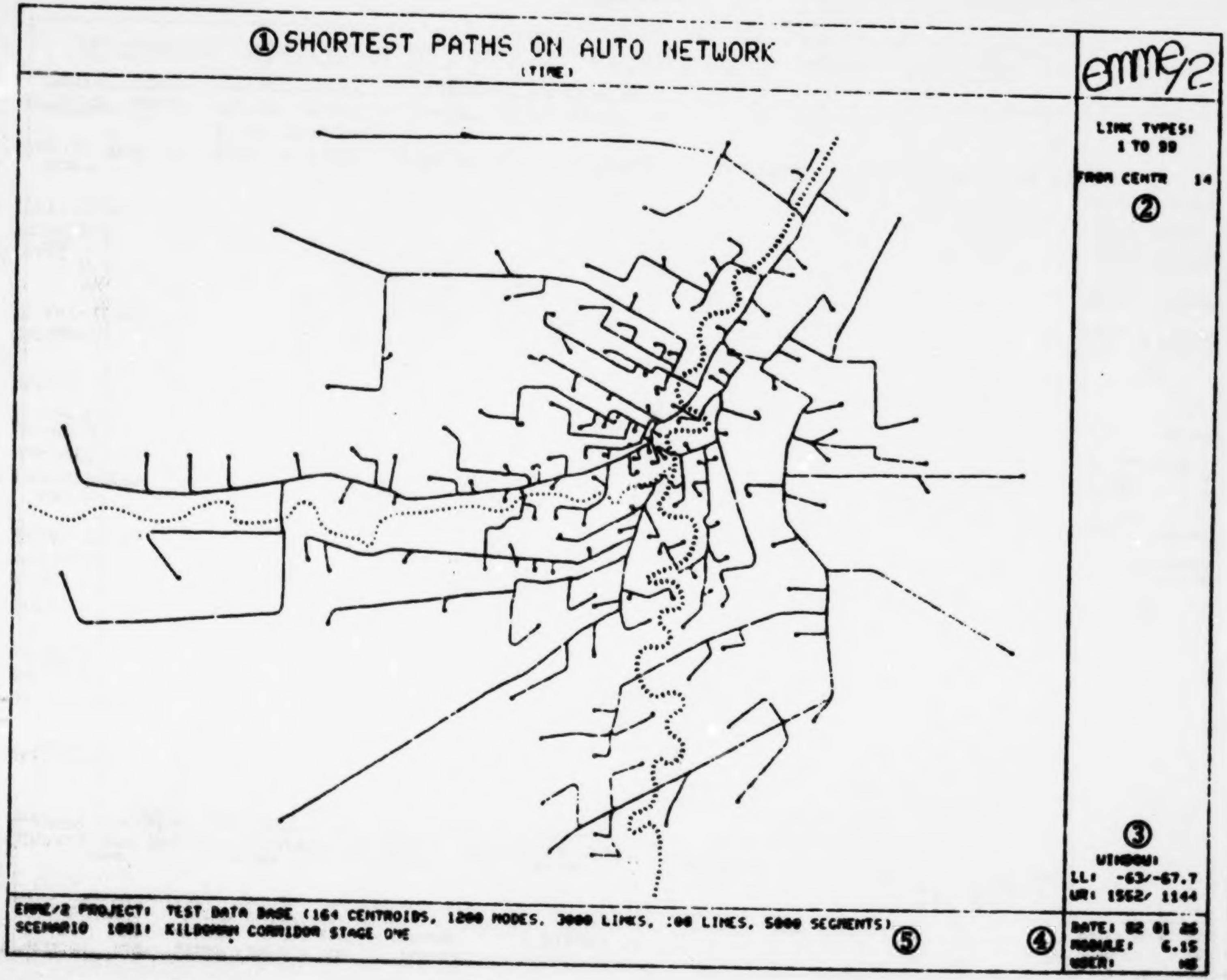

① SHORTEST PATHS ON AUTO NETWORK
(TIME)
emme/2
LINK TYPES: 1 TO 99
FROM CENTR 14
②
③
WINDOW:
LL: -63/-67.7
UR: 1562/ 1144
EMME/2 PROJECT: TEST DATA BASE (164 CENTROIDS, 1200 NODES, 3000 LINKS, 100 LINES, 5000 SEGMENTS)
SCENARIO 1001: KILDONAN CORRIDOR STAGE ONE
⑤
④
DATE: 82 01 26
MODULE: 6.15
USER:

Figure 16

(1) COMPARAISON DES HISTOGRAMMES DE MF02: TRTIMO ET MF04: TRTIM1
DENSITÉ (VALEURS RÉELLES)

(2) FRÉQUENCE

(3) DÉPASSEMENT
EN-DEÇÀ
AU-DELÀ

POIDS

MOYENNE:
ÉCART-TYPE:

(4) DÉPASSEMENT
EN-DEÇÀ
AU-DELÀ

POIDS

MOYENNE:
ÉCART-TYPE:

(5) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(6) PROJET EMME/2: BASE DE DONNÉES D'ESSAI (164 CENTROÏDES, 1 200 NOEUDS, 3 000 LIENS, 100 LIGNES, 5 000 TRONÇONS)
MATRICE MF02: TRTIMO TEMPS DE TRANSPORT EN COMMUN
MATRICE MF04: TRTIM1 TEMPS DE TRANSPORT EN COMMUN

Figure 16

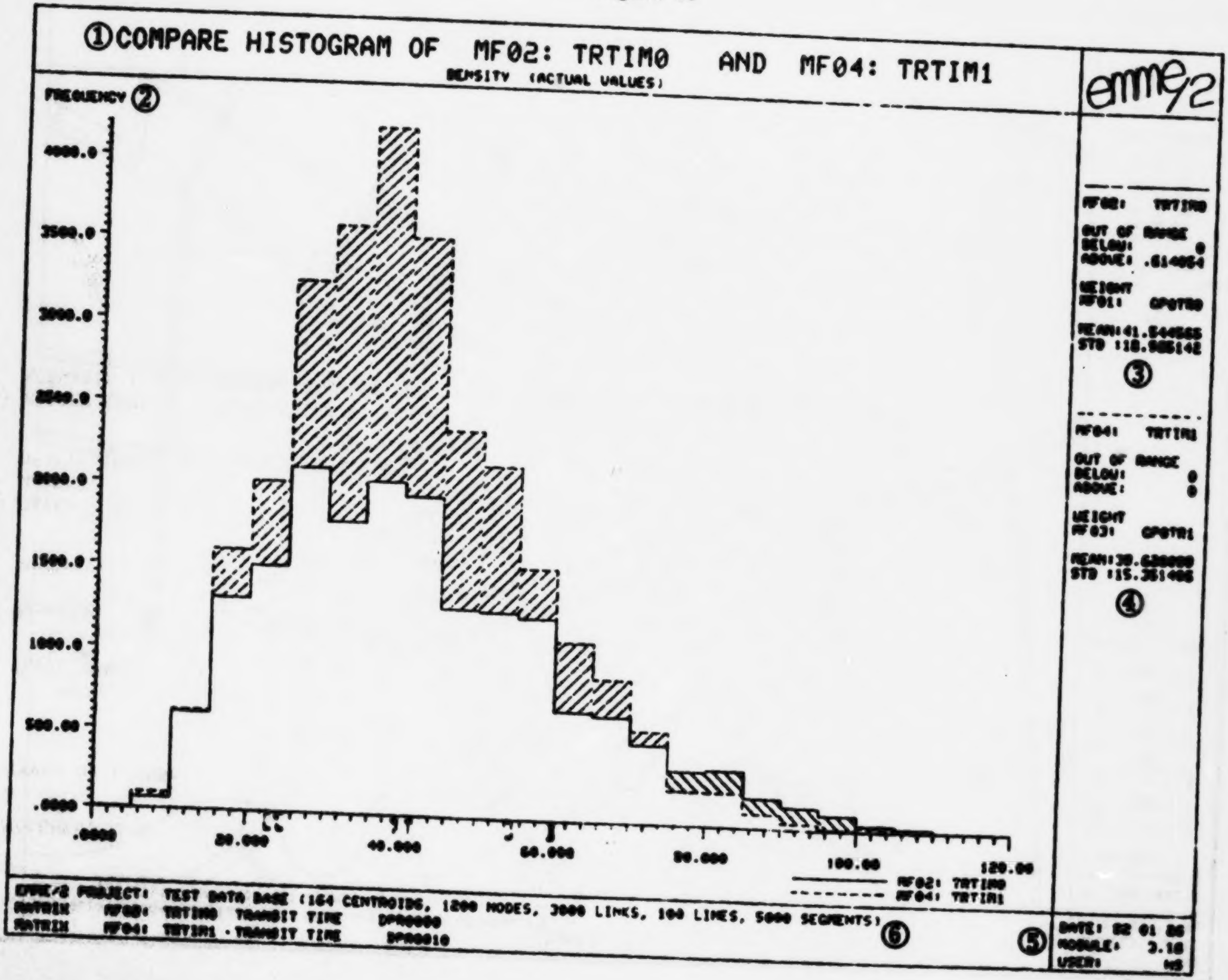

①COMPARE HISTOGRAM OF MF02: TRTIM0 AND MF04: TRTIM1
DENSITY (ACTUAL VALUES)
FREQUENCY ②
4000.0
3500.0
3000.0
2500.0
2000.0
1500.0
1000.0
500.00
.0000
20.000
40.000
60.000
80.000
100.00
120.00
MF02: TRTIM0
MF04: TRTIM1
emme/2
MF02: TRTIM0
OUT OF RANGE
BELOW: 0
ABOVE: .614064
WEIGHT
MF01: GPOTR0
MEAN:41.544565
STD :18.985142
③
MF04: TRTIM1
OUT OF RANGE
BELOW: 0
ABOVE: 0
WEIGHT
MF03: GPOTR1
MEAN:38.628000
STD :15.351406
④
EMME/2 PROJECT: TEST DATA BASE (164 CENTROIDS, 1200 NODES, 3000 LINKS, 100 LINES, 5000 SEGMENTS)
MATRIX MF02: TRTIM0 TRANSIT TIME DPR0000
MATRIX MF04: TRTIM1 - TRANSIT TIME DPR0010
⑥
⑤
DATE: 02 01 86
MODULE: 3.10
USER: HS

Figure 17

(1) VOLUMES, AUTO

(2) TYPES DE LIENS:
À

SEUIL:
INFÉRIEUR:

(3) ÉCHELLE:

FENÊTRE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 17

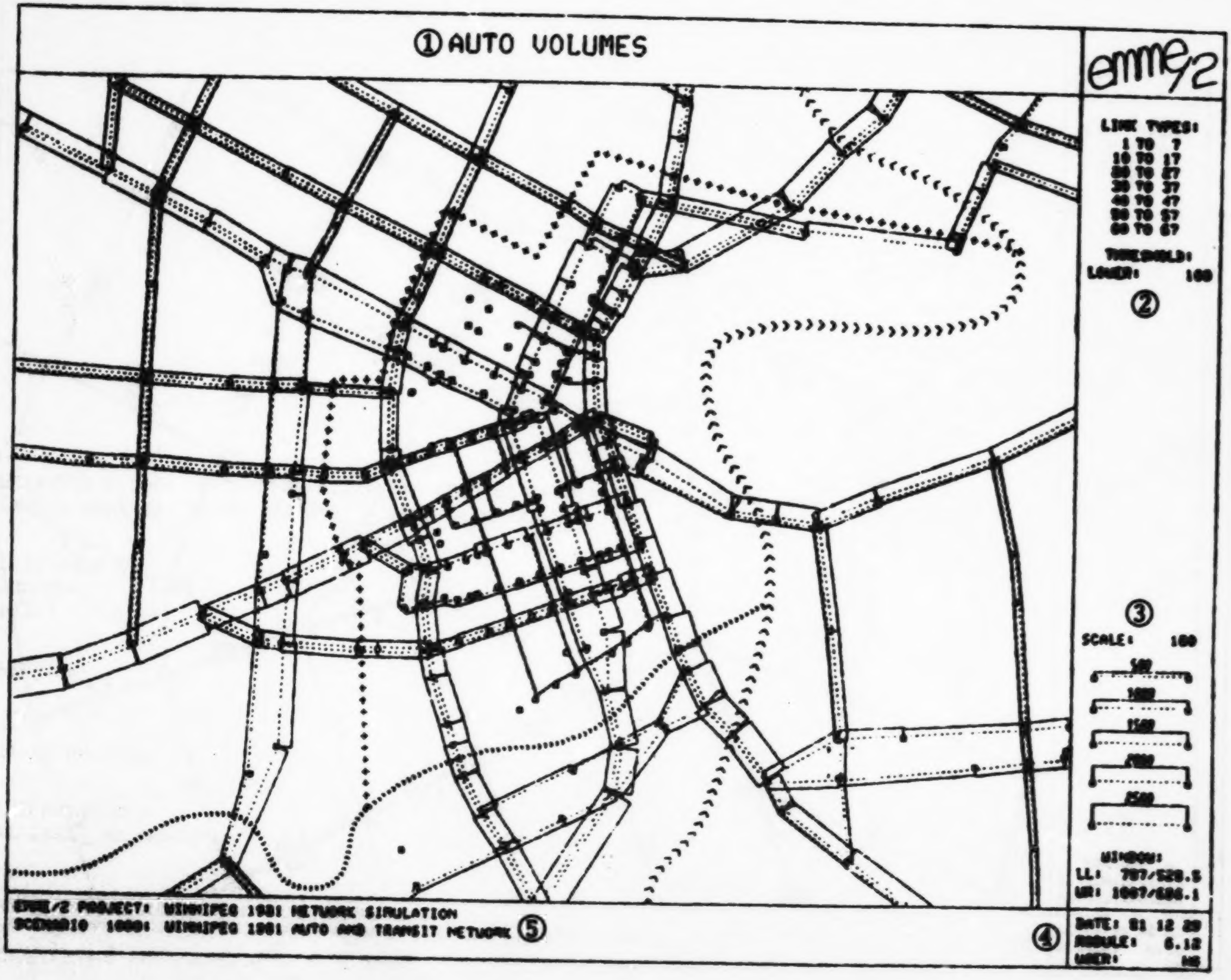

① AUTO VOLUMES
emme/2
LINK TYPES:
1 TO 7
10 TO 17
THRESHOLD:
LOWER: 100
②
③
SCALE: 100
500
1000
1500
2000
2500
WINDOW:
LL: 787/520.5
UR: 1067/686.1
④
DATE: 81 12 29
MODULE: 6.12
USER: HS
EMME/2 PROJECT: WINNIPEG 1981 NETWORK SIMULATION
SCENARIO 1000: WINNIPEG 1981 AUTO AND TRANSIT NETWORK ⑤

Figure 18

(1) VITESSE, AUTOMOBILES
(MILLE/HEURE)

(2) TYPES DE LIENS:
À

(3) FENÊTRE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 18

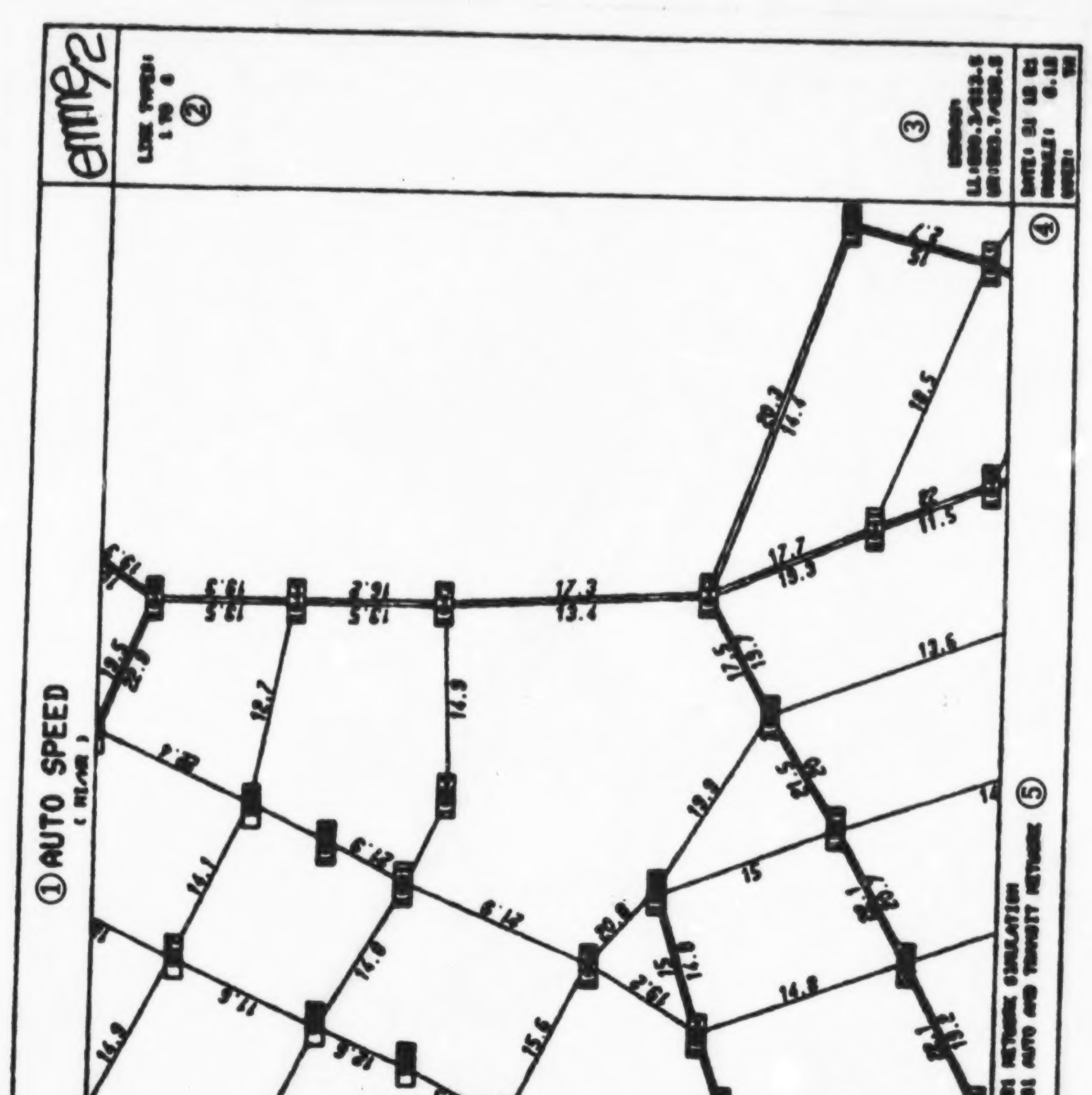


Figure 19

(1) VOLUMES, TRANSPORT EN COMMUN

(2) MODES:

TYPES DE LIENS:
À

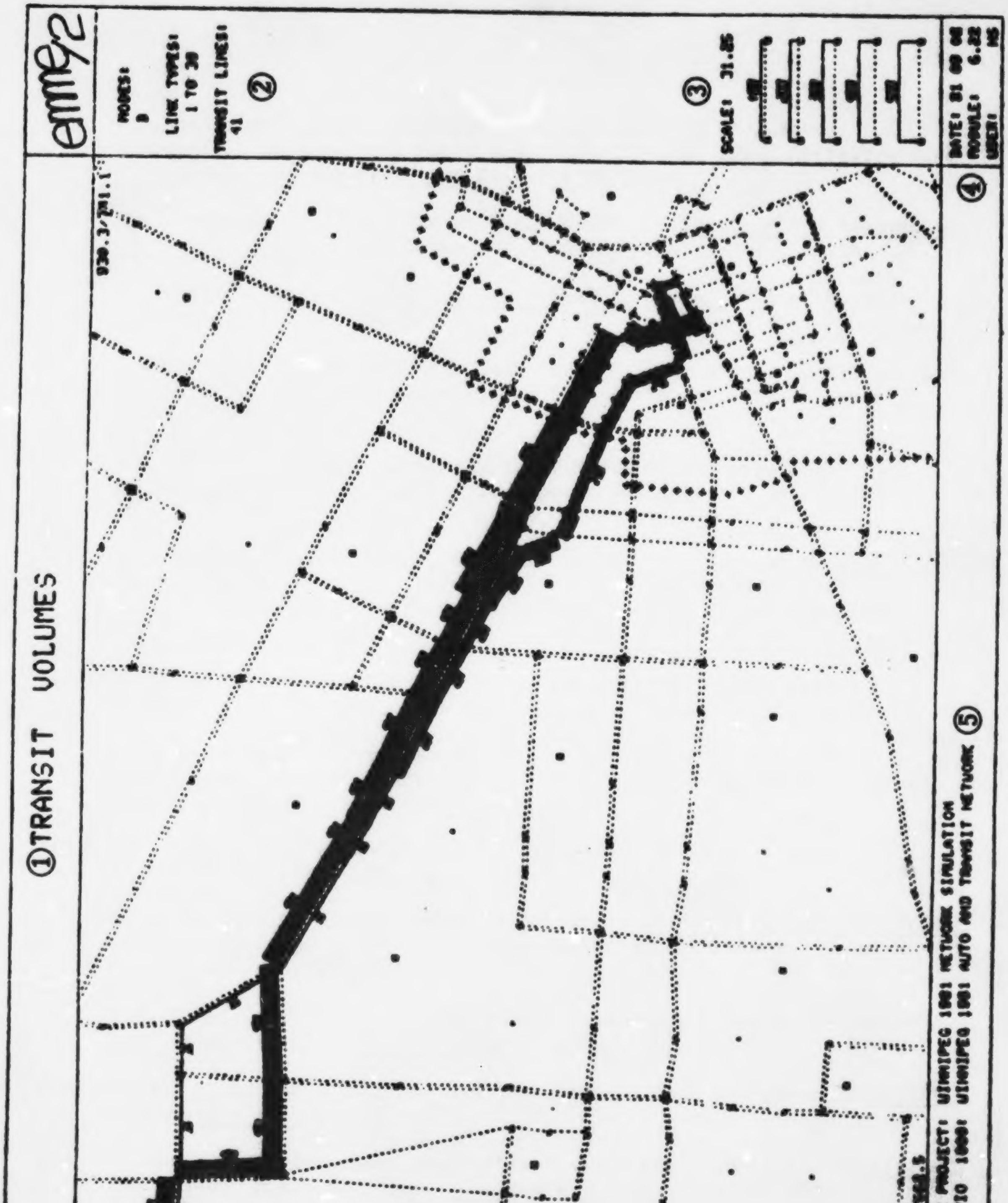
LIGNES DE TRANSPORT EN COMMUN:

(3) ÉCHELLE:

(4) DATE:
MODULE:
UTILISATEUR:

(5) PROJET EMME/2: SIMULATION DU RÉSEAU DE WINNIPEG, 1981
SCÉNARIO 1 000: RÉSEAU DE WINNIPEG, AUTO ET TRANSPORT EN COMMUN, 1981

Figure 19



①TRANSIT VOLUMES
MODES:
LINK TYPES: 1 TO 30
TRANSIT LINES: 41
②
③
SCALE: 31.85
④
⑤
EMME/2 PROJECT: WINNIPEG 1981 NETWORK SIMULATION
SCENARIO 1000: WINNIPEG 1981 AUTO AND TRANSIT NETWORK

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

[1] H.Z. AASHTIANI et T.L. MAGNANTI, "Equilibria on a Congested Transportation Network", Opns. Res. Ctr., M.I.T., 1980. Paraîtra dans SIAM Journal on Algebraic and Discrete Methods.

[2] M.J. BECKMANN, C.B. MCGUIRE et C.B. WINSTEN, Studies in the Economics of Transportation. New Haven, CT, Yale University Press, 1956.

[3] D. BRAESS, Uber ein Paradoxen der Verkehrsplanning, Untermehmens forschung, 1968, p. 258-268.

[4] M. BRUYNOOGHE, A. GIBERT et M. SAKAROVITCH, "Une méthode d'affectation du trafic", quatrième symposium sur la théorie des flux de trafic, 1968.

[5] M.F. CHANG, L. EVANS, R. HERMAN et P. WASILIEWSKI, Gasoline Consumption in Urban Traffic, Transportation Research Record 599, 1976, p. 25-30.

[6] S. DAFERMOS et A. NAGURNEY, Sensitivity Analysis for the General Asymmetric Network Equilibrium Problem, Technical Report LCDS # M-82-7, Lefschetz Centre for Dynamical Systems, Brown University, 1982.

[7] S. DAFERMOS, "Traffic Equilibrium and Variational Inequalities", Transportation Science, vol. 14, 1980, p. 42-54.

[8] S.C. DAFERMOS, "The General Multimodal Network Equilibrium Problem with Elastic Demand", Lefaschetz Center for Dynamical Systems, Brown University, 1980. Paraîtra dans Networks.

[9] S. DAFERMOS, "An Extended Traffic Assignment Model with Applications to Two-way Traffic", Transportation Science, vol. 4, 1971, p. 336-389.

[10] G. DANTZIG, S.F. MAIER et Z.F. LANSDOWNE, Application of Decomposition to Transportation Network Analysis, Technical Report DOT-TSC-OST-76-26, Control Analysis Corporation, 1976.

[11] R.B. DIAL, "A Probabilistic Multipath Assignment Model which Obviates Path Enumeration", Transportation Research, vol. 8, 1971, p. 85-96.

[12] P. DOW et D. VAN VLIET, "Capacity Restrained Road Assignment", Traffic Engineering and Control, 1979, p. 261-273.

[13] J. DUPUIT, "De la mesure de l'utilité des travaux publics", Annales des travaux publics, Annales des ponts et chaussées, 2^{e} série, 8, 1844.

[14] S.P. EVANS, "Derivation and Analysis of Some Models for Combining Trip Distribution and Assignment", Transportation Research, vol. 10, 1976, p. 37-57.

[15] C. FISK et S. PALLOTTINO, "Empirical Evidence for Equilibrium Paradoxes with Implications for Optimal Planning Strategies", Transportation Research A, vol. 15A, n° 3, 1981, p. 245-248.

[16] M. FLORIAN et S. NGUYEN, "An Application and Validation of Equilibrium Trip Assignment Methods", Transportation Science, vol. 10, 1976, p. 374-389.

[17] M. FLORIAN, J. FERLAND et S. NGUYEN, "On the Combined Distribution-Assignment of Traffic", Transportation Science, vol. 9, 1975, p. 43-53.

[18] M. FRANK et P. WOLFE, "An Algorithm of Quadratic Programming", Naval Res. Log. Quarat. 3, 1956, p. 95-110.

[19] C. FRANK, "A Study of Alternative Approaches to Combined Trip Distribution-Assignment Modeling", thèse de doctorat, Department of Regional Science, University of Pennsylvania, 1978.

[20] M. HALL, "Properties of the Equilibrium State in Transportation Networks", Transportation Science, vol. 12, 1978, p. 208-216.

[21] D. KINDERLEHRER et G. STAMPACCHIA, "An Introduction to Variational Inequalities and Applications", Academic Press, 1980.

[22] F.H. KNIGHT, "Some Fallacies in the Interpretation of Social Cost", Quarterly Journal of Economics, 38, 1924, p. 582-606.

[23] L.J. LEBLANC et K. FARHANGIAN, "Efficient Algorithms for Solving Elastic Demand Traffic Assignment Problems and Mode Split Assignment Problems", Transportation Science, vol. 15, 1981, p. 306-312.

[24] L.J. LEBLANC, E.K. MORLOK et W.P. PIERSKALLA, "An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem", Transportation Research, vol. 5, 1975, p. 309-318.

[25] L.J. LEBLANC, "Mathematical Programming Algorithms for Large Scale Network Equilibrium and Network Design Problems", dissertation de doctorat, Dept. of Ind. Eng. and Mgt. Sci., Northwestern University, 1973.

[26] J.D. MURCHLAND, "Braess' Paradox of Traffic Flow", Transportation Research, vol. 4, 1970, p. 391-394.

[27] M. NETTER, "Equilibrium and Marginal Cost Pricing on a Road Network with Several Traffic Types", dans Traffic Flow and Transportation, compte rendu du 5e symposium international sur la théorie du flux du trafic et du transport, G.F. Newell (éd.), Springer-Verlag, 1971.

[28] S. NGUYEN, Procedures for Equilibrium Traffic Assignment with Elastic Demand, publication n° 39, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, 1977.

[29] S. NGUYEN, "A Unified Approach to Equilibrium Methods for Traffic Assignment", dans Traffic Equilibrium Methods, compte rendu 1974, M. Florian (éd.), vol. 118, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer-Verlag, 1976, p. 148-182.

[30] S. NGUYEN, "Une approche unifiée des méthodes d'équilibre pour l'affectation du trafic", dissertation de doctorat, Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, 1973.

[31] R.B. POTTS et R.M. OLIVER, "Flows on Transportation Networks", New York, Academic Press, 1972.

[32] M.J. SMITH, "Existence, Uniqueness and Stability of Traffic Equilibria", Transportation Research B, vol. 13B, 1979, p. 295-304.

[33] N.F. STEWART, "Notes on the Mathematical Structure of Equilibrium Models", Technical Report LITH-MATH-12-79-8, Department of Mathematics, Linkoping Institute of Technology, 1979.

[34] J.G. WARDROP, "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research", Proc. Inst. Civil Engineers, part II, 1952, p. 325-378.

BIBLIOGRAPHIE

Modèles multi-modaux - non interactifs - non graphiques:

FLORIAN, M., R. CHAPLEAU, S. NGUYEN, C. ACHIM, L. JAMES-LEFEBVRE, S. GALARNEAU, J. LEFEBVRE et C. FISK. "Validation and Application of an Equilibrium-Based Two-Mode Urban Transportation Planning Method (EMME)", Transportation Research Record, n° 728, 1979, p. 14-22.

URBAN MASS TRANSPORTATION ADMINISTRATION. Urban Transportation Planning System Reference Manual, Washington, DC, U.S. Department of Transportation, 1977 (et autres mises à jour).

Planification du transport en commun - applications interactives et graphiques:

ANDREASSON, I. "The Volvo Approach to Computer-Aided Transit Planning", Transportation Research Record, n° 657, 1978.

GENERAL MOTORS TRANSPORTATION SYSTEMS CENTER. Interactive Graphic Transit Design (IGTDS) Demonstration Study: Bellevue, Washington, rapport final, volumes I et II (EP-80023A), Warren, Michigan, GMTSC, 1980.

KORNHAUSER, A.L., et J.L. HESS. "Interactive Graphics Sketch Planning Model for Urban Transportation", Transportation Research Record, n° 657, 1978.

RAPP, M.H., S. PIGUET et A. ROBERT-GRANDPIERRE. "Interactive Graphic System for Transit Route Optimization", Transportation Research Record, n° 588, 1978, p. 6-10.

RIEPL, R.J., et C.D. GEHNER. "Interactive Graphics in Europe: Three Computer-Aided Transportation Tools", Computer Graphics, vol. 2, n° 5, 1979, p. 30-36.

SCHNEIDER, J.B. "Interactive Graphics in Transportation System Planning", DOT-TST-74-10, rapport final sur un séminaire tenu à Seattle, Washington, MTIS, Springfield, VA, janvier 1974, 99, p. 227-264.

Algorithmes d'affectation:

ABDULAAL, M., et L.J. LEBLANC. "Methods for Combining Modal Split and Equilibrium Assignment Models", Transportation Science, vol. 13, 1979, p. 292-314.

CHRIQUI, C., et P. ROBILLARD. "Common Bus Lines", Transportation Science, vol. 9, 1975, p. 115-121.

DAFERMOS, S.C. Relaxation Algorithms for the General Asymmetric Traffic Equilibrium Problem, Lefschetz Centre for Dynamical Systems, Brown University, 1981.

FISK, C., et S. NGUYEN. "Properties of the Two Mode Equilibrium Assignment Model with Flow Dependent Transit Costs", Transportation Science, vol. 15, n° 4, 1981, p. 318-328.

FLORIAN, M. "A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes", Transportation Science, vol. 8, 1977, p. 169-179.

FLORIAN, M., et H. SPIESS. On Two Mode Choice/Assignment Models, publication n° 117, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, 1981 (paraître dans Transportation Science).

FLORIAN, M., et H. SPIESS. The Convergence of Diagonalization Methods for Fixed Demand Asymmetric Network Equilibrium Problems, publication n° 198, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, 1981 (paraître dans Transporation Research).

Algorithmes d'équilibrage des matrices:

EVANS, S.P., et H.R. KIRBY. "A Three-Dimensional Furness Procedure for Calibrating Gravity Models", Transportation Research, vol. 8, 1974, p. 105-122.

EVANS, A.W. "The Calibration of Trip Distribution Models with Exponential or Similar Cost Functions", Transportation Research, vol. 5, 1971, p. 15-38.

Appendice I

FONCTIONS CONVEXES ET MONOTONES

DÉFINITION - Une fonction numérique f définie dans un ensemble convexe Ω est convexe si pour chaque x, $y \in \Omega$ et pour α, $0 \leq \alpha \leq 1$

$$\alpha f(x) + (1-\alpha) f(y) \geq f(\alpha x + (1-\alpha)y)$$

Si l'inégalité ci-dessus est vérifiée comme étant une inégalité stricte pour $x \neq y$, α, $0 < \alpha < 1$, la fonction f est strictement convexe.

DÉFINITION - Une fonction numérique g définie dans un ensemble convexe Ω est dite concave si la fonction $f = -g$ est convexe. La fonction g est strictement concave si $-g$ est strictement convexe.

PROPRIÉTÉ 1 - Soient f_1 et f_2 des fonctions convexes définies dans un ensemble convexe Ω. Dans ce cas, la fonction $f_1 + f_2$ est une fonction convexe de l'ensemble Ω.

PROPRIÉTÉ 2 - Soit f une fonction convexe dans l'ensemble convexe Ω. La fonction af est convexe pour n'importe quelle inégalité $a \geq 0$.

Les fonctions convexes différentiables ont plusieurs propriétés importantes et utiles.

PROPRIÉTÉ 3 - Soit f une fonction convexe et différentiable définie dans un ensemble convexe Ω. f est convexe si et seulement si $f(y) \geq f(x) + \nabla f(x)(y-x)$ pour tous les x, $y \in \Omega$.

DÉFINITION - Une fonction vectorielle h définie dans un ensemble Ω convexe est monotone si $(h(x)-h(y))(x-y) \geq 0$ pour x, $y \in \Omega$. Si l'inégalité ci-dessus est vérifiée comme étant une inégalité stricte pour $x \neq y$, x, $y \in \Omega$, la fonction est strictement monotone. Si une fonction h est monotone, sa forme négative est antitone.

PROPRIÉTÉ 4 - Soit f une fonction convexe et différentiable définie dans un ensemble Ω convexe. f est convexe si et seulement si ∇f est monotone, c'est-à-dire si $(\nabla f(x) - \nabla f(y))(x-y) \geq 0$ pour $x, y \in \Omega$.

Voici des résultats classiques ayant trait à la minimisation des fonctions convexes.

PROPRIÉTÉ 5 - Soit f une fonction convexe définie dans un ensemble Ω convexe. Dans ce cas, f réalise son minimum sur un ensemble Γ convexe et tout minimum local de f est un minimum global.

PROPRIÉTÉ 6 - Soit f une fonction convexe et différentiable définie dans un ensemble convexe Ω. x^* est un minimum global de f sur Ω, si pour tous les $y \in \Omega$, $\nabla f(x^*)(y-x^*) \geq 0$.

<u>Documents de référence pour l'appendice I:</u>

- O.L. MANAGASARIAN, <u>Nonlinear Programming</u>, McGraw Hill, 1964.
- D.G. LUENBERGER, <u>Introduction to Linear and Nonlinear Programming</u>, Addison-Wesley, 1965.

Appendice II

MÉTHODES PRIMAIRES DE SOLUTION DES PROGRAMMES NON LINÉAIRES

Considérons la solution du problème programmation non linéaire

$$\begin{aligned} &\min f(x) \\ &\text{sous réserve de } g(x) \leq 0 \\ &\qquad\qquad\qquad h(x) = 0 \end{aligned}$$

Une <u>méthode primaire</u> de solution est un procédé qui traite directement le problème en cherchant la solution optimale dans la région réalisable. Chaque point engendré par le procédé est réalisable et la valeur de la fonction objective décroît constamment.

Une <u>direction réalisable</u> d_k est un vecteur qui permet, à partir d'un x_k^{ℓ} réalisable, de produire $x^{\ell+1} = x^{\ell} + \lambda^{\ell} d^{\ell}$, où λ^{ℓ} est une grandeur scalaire non négative. Cette grandeur scalaire est choisie pour minimiser la fonction objective f, tel que x_{k+1} est réalisable. Ainsi donc, un vecteur d_k est une direction réalisable à x_k s'il existe un $\bar{\lambda} > 0$, tel que $x_k + \lambda d_k$ est réalisable pour tous λ, $0 \leq \lambda \leq \bar{\lambda}$ et $\nabla f(x^{\ell})^T d^{\ell} \leq 0$.

L'une des plus simples méthodes basées sur la direction réalisable et appliquée au problème de minimisation d'une fonction convexe f sous réserve des contraintes linéaires $Ax = b$, $x \geq 0$, est la méthode d'approximation linaire. Étant donné un point réalisable x_k, le vecteur de direction choisi est $(y^{\ell} - x^{\ell})$ où y^{ℓ} est la solution du programme linéaire

$$\begin{aligned} &\min \ \nabla f(x^{\ell})^T y \\ &\text{sous réserve de } Ay = b \\ &\qquad\qquad\qquad\quad y \geq 0 \end{aligned}$$

$d^{\ell}=(y^{\ell}-x^{\ell})$ est une direction de descente étant donné que les conditions d'optimisation du programme linéaire susmentionné sont que $\nabla f(x^{\ell})^{T}(y-y^{\ell}) \geq 0$ et pour $y=x^{\ell}$, que $\nabla f(x^{\ell})^{T}(y^{\ell}-x^{\ell}) < 0$, à moins que $x^{\ell}= x^{*}$, est la solution du programme convexe où $\nabla f(x^{*})^{T}(y-x^{*}) \geq 0$.

Voici les étapes détaillées de l'algorithme d'approximation linéaire qui permet de résoudre ce problème:

ÉTAPE 1 - Étant donné une solution réalisable x^{1}, poser $\ell = 1$.

ÉTAPE 2 - Déterminer y^{ℓ} qui minimise $\nabla f(x^{\ell})y$, sous réserve de $A\ y = b$, $y \geq 0$.

ÉTAPE 3 - Poser la direction de descente $d^{\ell}= y^{\ell}- x^{\ell}$.

Si $|\nabla f(x^{\ell})d^{\ell}| \leq \varepsilon$, terminer, ε étant un paramètre de convergence convenable, (x^{ℓ} est la solution optimale).

ÉTAPE 4 - Trouver la longueur de pas optimale λ^{ℓ} qui minimise $F(x^{\ell} + \lambda d^{\ell})$ pour $0 \leq \lambda \leq 1$.

ÉTAPE 5 - Réviser la solution courante $x^{\ell+1}=x^{\ell}+ \lambda^{\ell} d^{\ell}$;

poser $\ell = \ell + 1$ et retourner à l'étape 2.

Appendice III

LES CONDITIONS DE KUHN-TUCKER

Prenons le problème de programmation non linéaire

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(x) \\ \text{sous réserve de} \quad & g(x) \leq 0 \\ & h(x) = 0 \end{aligned}$$

Soit x^* une solution réalisable qui est un minimum local du problème susmetionné. Dans ce cas, il existe un vecteur λ et un vecteur μ , $\mu \geq 0$, tel que

$$\nabla f(x^*) + \lambda \nabla h(x^*) + \mu \nabla g(x^*) = 0$$

et $$\mu g(x^*) = 0$$

Si $f(x)$ est convexe et que l'ensemble réalisable soit également convexe, les conditions de Kuhn-Tucker sont nécessaires et suffisantes pour que x^* soit un minimum global de $f(x)$.

Appendice IV

PRINCIPE DE DUALITÉ POUR LES PROGRAMMES LINÉAIRES

Prenons le programme linéaire

$$\text{Min } cx$$

$$\text{sous réserve de } \; Ax = b$$
$$x \geq 0$$

et son problème complémentaire correspondant

$$\text{Max } ub$$

$$\text{sous réserve de } \; uA \leq c$$

PROPRIÉTÉ 1 - Si x et u sont des solutions primaires et complémentaires réalisables et que cx = ub, elles sont également des solutions optimales.

PROPRIÉTÉ 2 - Si x et u sont des solutions réalisables pour les problèmes primaire et complémentaire, la condition nécessaire et suffisante pour qu'elles soient toutes les deux optimales est que (uA-c)x = 0.

<u>Document de référence pour les appendices II, III et IV</u>:

- D.G. LUENBERGER, <u>Introduction to Linear and Nonlinear Programming</u>, Addison-Wesley, 1965.

POOR

QUALITY

ORIGINAL